

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Zjemňování struktury v pásu plechu na zařízení DRECE

Grain refinement in strip sheet by DRECE machinery

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc.

Student:

Bc. Michal Janča

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Michal Janča

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Zjemňování struktury v pásu plechu na zařízení DRECE
Grain Refinement in Strip Sheet by DRECE Machinery

Zásady pro vypracování:

- 1) Provedte rešerši nových poznatků z vývoje technologií výroby velmi jemnozrnných materiálů s využitím procesu SPD (vícenásobné plastické deformace).
- 2) Experimentálně ověřte protlačování nástrojem DRECE pásu plechu z mosazi a uhlíkové oceli.
- 3) Ověřte vliv počtu průchodů a tepelného zpracování na velikost mechanických vlastností u plechu z mosazi.
- 4) Ověřte vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti u plechu z uhlíkové oceli.
- 5) Provedte metalografické vyhodnocení vlivu počtu průchodů a tepelného zpracování na zjemnění zrna u obou materiálů.
- 6) Provedte návrh konstrukční úpravy tvářecího nástroje u zařízení DRECE pro zvýšení efektivity protlačovacího procesu.
- 7) Provedte celkové vyhodnocení dosažených výsledků a uveďte možné směry vývoje zjemňování struktury u kovových materiálů.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) CHAKKINGAL, U., SURIADI, A.B., THOMSON, P.T. Microstructure development during equal channel angular drawing of Al at room temperature, *Scripta Materialia*, 1998, 39, p. 677–684.
- 2) HUANG, Y., PRANGNELL, P., B. Continuous frictional angular extrusion and its application in the production of ultrafine-grained sheet metals, *Scripta Materialia*, 26 October 2006, vol. 56, p. 333 – 336.
- 3) MAKENZIE, P. W. J, LAPOVOK, R. and THOMSON, P. F. Enhanced ductility due to grain refinement by equal channel angular extrusion in automotive aluminium alloy 6016, *Rev. Adv. Material Science and Forum*, January 2006, vol. 503, p. 657–662
- 4) SEGAL, V., M. Mechanics of continuous equal-channel angular extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, p. 542–549.
- 5) VALIEV, R. Z. The new SPD processing trends to fabricate bulk nanostructured materials, *Rev. Adv. Material Science and Forum*, June 2007, vol. 114, p. 7–18.
- 6) WU, P., XIE, S., LI, H., YAN, M., HUANG, G., CHENG, L. Effect of extrusion wheel angular velocity on continuous extrusion forming of copper concave bus bar, *Trans. Nonferrous Soc.*, 2007, China 17, p. 280–286.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



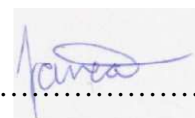

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

23.5.2011

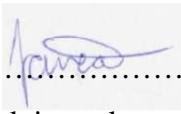


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb, autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě... 23.5.2011

.....


podpis studenta

Mnichov 332

793 26 VRBNO POD PRADĚDEM

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JANČA, M. *Zjemňování struktury v pásu plechu na zařízení DRECE: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, 74 s. Vedoucí práce: Rusz, S.

Diplomová práce se zabývá vlivem počtu průchodů experimentálním zařízením DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion) na změnu mechanických vlastností a zjemnění mikrostruktury daných vzorků. Byly zhodnoceny dva různé materiály, mosaz Cu65Zn35 a uhlíková ocel 11 321. První část obsahuje nejnovější poznatky z vývoje ultra-jemnozrnných struktur, následuje ověřování vlivu počtu průchodů zařízením DRECE na mechanické vlastnosti obou materiálů. V následující části se zabývám metalografickým vyhodnocením provedených experimentů. Následuje vyhodnocení dosažených výsledků. Ve finální části je uveden konstrukční návrh nového tvářecího nástroje z hlediska zvýšení efektivity procesu vícenásobné plastické deformace. V závěru je uvedeno celkové vyhodnocení cílů diplomové práce.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

JANČA, M. *Grain refinement in strip sheet by DRECE machinery: Master Thesis*. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2010, 74 p. Thesis head: Rusz, S.

Master thesis goes in for impression of number of pass through experimental DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion) machinery on change mechanical properties and grain refinement on reserved samples. Two various materials were reviewed, brass Cu65Zn35 and carbon steel 11 321. Forepart includes newest information from development ultra-fine grained structures, follows checking influence number of passes through DRECE machinery on mechanical properties both of materials. The following part go in for metallographic results on number of passes and in final part includes proposal of new extrusion tool for increasing effective of extrusion process. At the close is mentioned general evaluation aims of master thesis.

Obsah

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	6
Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod	11
1. Proved'te rešerši nových poznatků z vývoje technologií výroby velmi-jemnozrnných materiálů s využitím procesu SPD	13
1.1. SPD – základní proces, využívaný u většin metod výroby velmi-jemnozrnných materiálů (UFG)	13
1.2. Rozdělení a popis technologií pro výrobu UFG materiálů	14
1.3. Nové poznatky z vývoje velmi-jemnozrnných materiálů	29
2. Experimentální ověření protlačování pásu plechu z mosazi a uhlíkové oceli nástrojem DRECE.....	39
2.1 Popis prototypového zařízení DRECE.....	39
2.2 Popis materiálů pro zpracování zařízením DRECE	40
3. Vliv počtu průchodů a tepelného zpracování na velikost mechanických vlastností u plechu z mosazi.....	43
3.1 Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi bez tepelného zpracování na mechanické vlastnosti.	43
3.2 Vliv počtu průchodů nástrojem DRECE na změnu tvrdosti a mechanických vlastností u mosazi bez tepelného zpracování.	46
3.3 Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi s tepelným zpracováním (450°C/15 min) na mechanické vlastnosti.	50
3.4 Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi s tepelným zpracováním (200°C/15 min) na mechanické vlastnosti.	55
4. Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti u plechu z uhlíkové oceli.	59
5. Metalografické vyhodnocení vlivu počtu průchodů a tepelného zpracování na zjemnění zrna obou materiálů.....	66
5.1. Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi Cu65Zn35 na velikost zrna. .	66

5.2.	Vliv počtu průchodů u plechu z oceli 11 321 na velikost zrna.	69
6.	Konstrukční úpravy tvářecího nástroje u zařízení DRECE na zvýšení efektivity protlačovacího procesu.....	71
7.	Celkové vyhodnocení dosažených výsledků.....	72
	Seznam použité literatury:	75

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
A_{80}	Tažnost	[%]
d	Výchozí průměr	[mm]
D	Konečný průměr	[mm]
n	Počet opakování	[-]
N	Počet otáček	[ot·min ⁻¹]
p	Tlak	[MPa]
P	Přítlak	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
R_1	Vnitřní rádius nástroje	[mm]
R_2	Vnější rádius nástroje	[mm]
t	Konečná tloušťka plechu	[mm]
T	Původní tloušťka plechu	[mm]
V	Objem	[mm ³]
x	Aritmetický průměr hodnot	[mm]
Z	Kontrakce	[%]
γ	Velikost skutečné stříhové deformace	[-]
$\Delta\epsilon_i$	Přírůstek intenzity deformace	[-]
ϵ_{VM}	Průměrná velikost deformace	[-]
\emptyset	Vnitřní nástrojový úhel	[°]
Ψ	Vnější nástrojový úhel	[°]
$\bar{\sigma}$	Střední napětí	[MPa]
σ_i	Intenzita napětí	[MPa]

Seznam použitých zkratk

ARB	Kumulativní válcování (Accumulative Roll Bonding)
CCSS/C2S2	Kontinuální uzavřené protlačování pásu plechu (Continuous Confined Strip Shearing)
CEC	Cyklické protlačování a stlačování (Cyclic Extrusion-Compression)
CFAE	Kontinuální úhlové protlačování (Continuous Frictional Angular Extrusion)
CRCS	Kontinuální cyklické protlačování a stlačování (Continuous Repetitive Corrugation and Straightening)
CONFORM	Kontinuální protlačování nástrojem (Continuous Extrusion Forming)
DRECE	Protlačování plechu přes kanál pomocí válců (Dual Rolling Equal Channel Extrusion)
ECAP	Protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem (Equal Channel Angular Pressing)
HTP	Krut za vysokého tlaku (High Torsion Pressure)
HV5	Tvrdost dle Vickerse (zatížení 5 kg)
HV10	Tvrdost dle Vickerse (zatížení 10 kg)
RCS	Opakované zvlňování a rovnání (Continuous Repetitive Corrugation and Straightening)
SPD	Vícenásobná plastická deformace (Severe Plastic Deformation)
TE	Protlačování s krutem (Twist Extrusion)
TRIP	Transformačně indukovaná plasticita (Transformation-Induced Plasticity)
UFG	Velmi jemnozrnné materiály (Ultra-Fine Grain)

Úvod

Strojírenství vždy bylo a je neodmyslitelnou součástí celé ekonomiky naší země. Jeho výsledky jsou rozhodující pro mnoho dalších oborů. Žijeme v době neustále se zvyšujících nároků na kvalitu a produktivitu výroby, a proto jsou výrobci nuceni ke stálému zdokonalování stávajících technologií produkce. Rozhodujícím faktorem se stává snaha o stálé zvyšování produktivity výroby za současného snižování energetických a materiálových nároků. Velkou úlohu zde má strojírenské tváření.

Technologie tváření je široce využívána nejen v různých oblastech strojírenství, ale rovněž i ve stavebním, chemickém a spotřebním průmyslu nebo v hutní prvovýrobě (válcování plechů a profilů, tažení drátů, protahování a vytlačování trub apod.). Efektivnost technologie tváření spočívá v trvalém udržení rozvoje, značných úsporách materiálu, ve vysoké jakosti výrobků a vysoké produktivitě.

K trvale udržitelnému rozvoji lidské společnosti značně přispívá technologie zpracovávající materiály s ultra-jemnou strukturou (nanostrukturní materiály). Vzhledem k rychlému rozvoji během posledních let je prováděn výzkum nanotechnologií ve vysokém tempu, protože tyto poznatky bezprostředně ovlivňují vývoj nových materiálů a následně nových výrobků. Nanostrukturní materiály mají průměrnou velikost zrna do $1\ \mu\text{m}$. Tyto materiály se vyznačují velmi vysokou tvařitelností při zachování, respektive zvýšení pevnostních vlastností a odolnosti vůči únavě.

Typickým rysem nanokrystalických materiálů je závislost meze kluzu na velikosti zrna. Technologie výroby vzorků materiálu jsou založeny na tzv. extrémní plastické deformaci SPD (severe plastic deformation), která vede k vytvoření ultrajemných zrn. Samozřejmě současně vzrůstá zájem o zkoumání ultrajemnozrnných materiálu tj. polykrystalických materiálu s velikostí zrna zpravidla menší než $1\ \mu\text{m}$. UFG (ultrafine – grained) materiály vytváří skupinu materiálu s jinými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi přisuzovanými jejich neobvyklé struktuře, které jsou odlišné od vlastností materiálu se standardní velikostí zrna.

Jednou z metod využívající proces SPD je CONFORM. CONFORM (Continuous Extrusion Forming) je metoda, která byla původně vyvinuta pro plynulé

vytlačování, ale při problémech s opotřebováním nástrojů bylo od této metody ustoupeno. V současnosti existuje mnoho otěruvzdorných materiálů, proto se opět navázalo na tuto metodu. Opakovaným použitím se zkouší dosáhnout velmi vysokého stupně deformace. Materiál, ve formě pásu plechu, je veden "podávacím válcem" s podporou "přítlačné kladky" a tlačěn do "tvářecího nástroje". Požadované zjemnění zrna materiálu přináší intenzivní deformace. Stupeň sklonu pro tuto metodu je $100^{\circ} - 130^{\circ}$. Dochází k dostatečnému zjemnění zrna a tímto i ke zvýšení mechanických vlastností. Dochází ovšem ke snížení tažnosti, které je možno kompenzovat vhodným tepelným zpracováním, aniž by došlo k podstatnému nárůstu zrna.

Na VŠB – TUO je podobné experimentální zařízení DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion). Toto zařízení je vyvíjeno na pracovišti Vývoje nových technologií, Fakulty strojní VŠB – TU Ostrava ve spolupráci s VÚHŽ Dobrá a.s. Na tomto stroji bude experimentálně ověřováno protlačení pásu plechu z mosazi a uhlíkové oceli, dále vliv počtu průchodů a tepelného zpracování na velikost mechanických vlastností u plechu z mosazi a uhlíkové oceli.

1. Proved'te řešerši nových poznatků z vývoje technologií výroby velmi-jemnozrnných materiálů s využitím procesu SPD

1.1. SPD – základní proces, využívaný u většin metod výroby velmi-jemnozrnných materiálů (UFG)

Vícenásobná plastická deformace (SPD) se postupně vyvíjí ve velice účinnou metodu výroby velmi-jemnozrnných materiálů (UFG) s vysokými mechanickými vlastnostmi. Před více než 10 lety byla demonstrována vícenásobná plastická deformace, jako efektivní přístup k vyprodukování velmi-jemnozrnných materiálů. Od té doby byl uskutečněn rozsáhlý vývoj ve výzkumu SPD technik a byly ustanoveny procesní parametry a cesty pro vytváření UFG kovů a slitin se zvýšenými vlastnostmi. Dnes se SPD techniky rychle vyvíjejí a jsou na pokraji posunu z laboratorního výzkumu do komerční produkce. Je dobře známo že velké množství plastické deformace může mít značné účinky na mikrostrukturu a tím na vlastnosti kovů a slitin. Například intenzivní válcování, nebo tažení je doprovázeno zjemňováním mikrostruktury a formováním zrn, subzrn a fragmentů, které mohou zvýšit mez pevnosti a zlepšit další vlastnosti. Avšak konvenční metody procesu deformace obvykle snižují tažnost materiálu. To je nevhodné a nepříjemné pro použití velké spousty konstrukčních materiálů. Toto omezení motivovalo ke vzrůstajícímu zájmu o vývoj SPD metod, které umožňují formování velmi-jemnozrnných struktur. Tyto UFG struktury vykazují nové mechanické vlastnosti, včetně zvýšení tažnosti. [1]

Krut za vysokého tlaku (HTP) a kanálové úhlové protlačování (ECAP) byly první techniky pro produkci nanostrukturálních kovů a slitin s velikostí zrna pod $1\mu m$. Od časů prvních experimentů byly stanoveny postupy a výrobní procesy pro mnoho kovových materiálů, včetně kovů s nízkou tažností a těžko deformovatelných materiálů. Tyto dvě metody HTP a ECAP byly modernizovány. Modernizace spočívá v zavedení pohyblivých součástí komponentů matrice a protitlak. V poslední době byl zaznamenán rapidní nárůst počtu jiných technik pro vznik UFG struktur, jako například, TE - protlačování s krutem (Twist Extrusion), CONFORM - kontinuální protlačování profilů

(Continuous Extrusion Forming), CEC - cyklické protlačování a stlačování (Cyclic Extrusion-Compression), RCS - opakované zvlňování a rovnání (Repetitive Corrugation and Straightening) a mnoho dalších. Dnes se SPD techniky rychle vyvíjejí a jsou na pokraji posunu z laboratorního výzkumu do komerční produkce. [1]

1.2. Rozdělení a popis technologií pro výrobu UFG materiálů

Rozdělení technologií pro výrobu velmi-jemnozrnných materiálů. Metody SPD mohou být rozděleny z několika hledisek. Mezi základní patří tyto:

- podle velikosti aplikovaného tlaku,
- podle plynulosti procesu,
- podle způsobů deformace.

V následující části bude rozvedeno rozdělení dle plynulosti procesu. Takto lze charakterizovat tváření po jednotlivých dávkách či sériích - poloplynulé procesy a na velkosériové - plynulé procesy.[4]

TVÁŘENÍ PO JEDNOTLIVÝCH DÁVKÁCH

K těmto metodám patří následující:

- **HPT** - vysokotlaký krut (High Pressure Torsion)
- **TE** - protlačování s krutem (Twist Extrusion)
- **ECAP (ECAE)** - kanálové úhlové protlačování (Equal Channel Angular Pressing/ Extrusion) a modifikace metody
- **CEC** - cyklické protlačování a stlačování (Cyclic Extrusion-Compression)
- **RCS** - opakované zvlňování a rovnání (Repetitive Corrugation and Straightening)

POLOPLYNULÉ PROCESY

Do této metody lze zařadit pouze **Kumulativní válcování (ARB)**.

Kumulativní válcování (ARB - Accumulative Roll Bonding) je slibná metoda pro výrobu velmi-jemnozrnných materiálů s využitím SPD procesu. Podstata metody spočívá v tom, že pás z daného materiálu, vyválcovaný na 50 % své původní tloušťky, se rozdělí na dva stejně dlouhé kusy o stejné tloušťce, které se dají na sebe a společně znovu válcují. ARB není jen válcovací proces, ale současně proces, při kterém dochází k opakovanému spojování pásů. Pro dosažení dobrého spojení pásů se pásy před stohováním mohou případně upravovat (odmaštění atd.). V některých případech se sestohované pásy pro dosažení dobrého spojení pásů a snížení válcovacích sil ohřívají pod rekrytalizační teplotu a ihned válcují. Tento postup lze bez omezení opakovat.

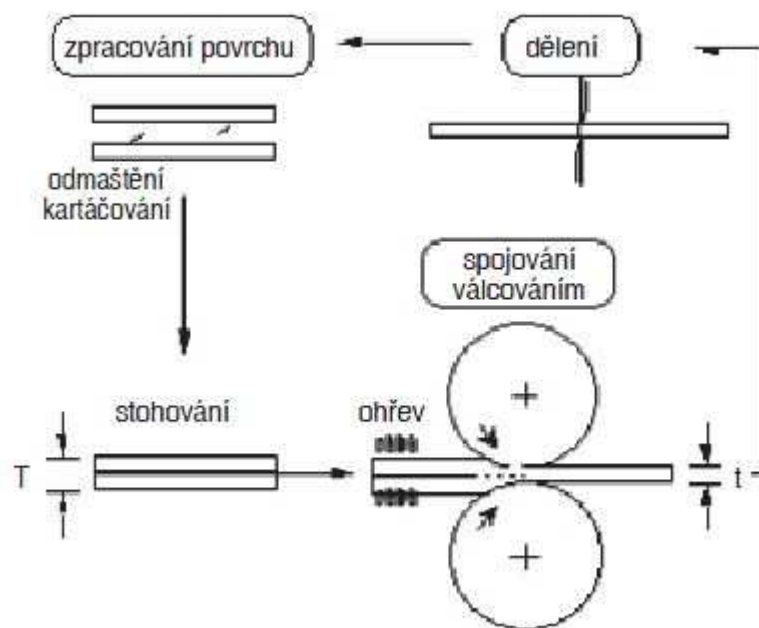
Velikost deformace ε_{VM} je možné vypočítat ze vztahu:

$$\varepsilon_{VM} = \frac{n \cdot 2}{\sqrt{3} \cdot \ln \cdot \frac{T}{t}} \quad (1)$$

kde: T - tloušťka plechu na vstupu do válců

t - tloušťka na výstupu.

Pro ARB nejsou potřebná žádná speciální zařízení, jen válcovací stolice s dostatečnou kapacitou a zaručenou rovinností válců. Nejvýraznějším problémem ARB je praskání hran pásů u hůře tvařitelných materiálů. Jako doporučení se uvádí zvětšení šířky pásu plechu při stejné tloušťce. ARB bylo úspěšně použito pro výrobu úzkých pásů celé řady kovů a slitin, zejména na bázi Al a dosáhlo se zjemnění zrna na velikost v rozmezí 47–320 nm. Schéma této metody je vyobrazeno na obr. č. 1.1.



Obrázek č. 1.1 Schéma ARB procesu

PLYNULÉ PROCESY

K těmto metodám patří následující:

- **CONFORM** - Kontinuální protlačování nástrojem (Continuous Extrusion Forming)
- **C2S2** - Kontinuální uzavřené protlačování pásu plechu (Continuous Confined Strip Shearing)
- **CRCS** – Opakované zvlňování a rovnání (Continuous Repetitive Corrugation and Straightening)
- **Conshearing process**
- Spojení metod **ECAP - CONFORM**

HTP (High torsion pressure)

Schéma metody je zobrazeno na obr. č. 1.2. Vzorky jsou diskového tvaru, obvykle o průměru 10-20 *mm* a tloušťce od 0,2 do 0,8 *mm*. Umísťují se mezi dvě kovadliny, jedna se otáčí, druhá je pevná. Tření za rotace mezi kovadlinou a povrchem vzorku umožňuje plynule zvyšovat stříhovou deformaci. Přiložená tlaková síla (1-10 GPa) v průběhu stříhové deformace účinně omezuje možnost porušení vzorku, přispívá k vyvolání extrémních deformací, a to i za studena velmi těžce tvařitelných materiálů. Podstatné zjemnění struktury bylo pozorováno již po půl otáčce nebo celé otáčce kovadliny. Pro dosažení homogenní struktury je však obvykle zapotřebí více otáček. Velikost skutečné stříhové deformace γ se dá vypočítat podle vztahu:

$$\gamma = \frac{2\pi \cdot N \cdot r}{t}, \quad (2)$$

kde: N - počet otáček,

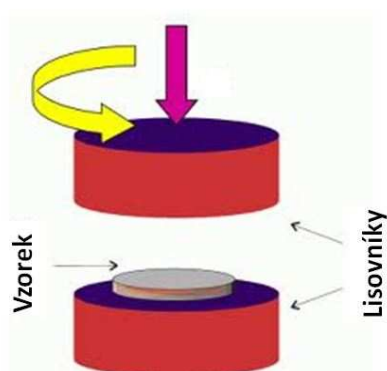
r - poloměr vzorku,

t - tloušťka.

Ekvivalentní deformaci ε_{VM} je možné vypočítat s použitím vztahu:

$$\varepsilon_{VM} = \frac{tg \gamma}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

U vzorku o tloušťce 0,8 *mm*, deformovaného jednou otáčkou při poloměru 4 *mm*, se ekvivalentní deformace rovná asi 20 (2000 %). Většinou není problém aplikovat na daném vzorku 10 nebo 100 otáček, což odpovídá ekvivalentní deformaci 200 nebo 2000⁸⁶. Takové hodnoty deformace prakticky nelze vyvolat jinými SPD způsoby.[4]

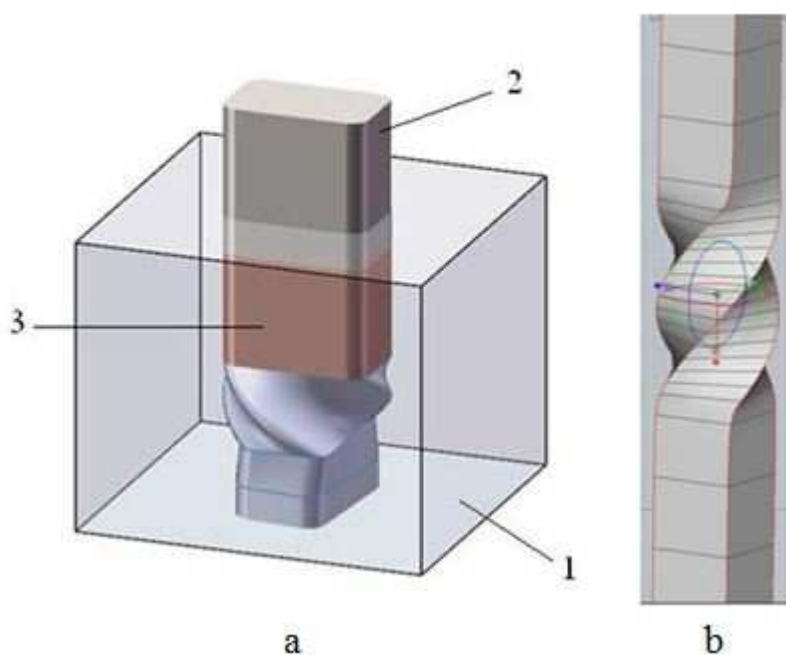


Obrázek č. 1.2 Schéma HPT metody

TE (Twist Extrusion)

Princip spočívá ve vytvoření intenzivní stříhové deformace protlačováním vzorků pravoúhlého průřezu zápustkou se šroubovitým kanálem. Tvar a průřez kanálu se podél osy protlačování nemění, zatím co kanál je podle této osy zkroucen. Rovněž tvar a průřez výtlačku se nemění, což dovoluje opakované protlačování. Existuje několik možností aplikace tlaku na protlačovaný sochor. Stříhová deformace není při zkrucování sochoru rozložena rovnoměrně po celém jeho průřezu. Větší část deformace je při průchodu zápustkou soustředěna na vstupu a výstupu ze zkroucené části zápustky. Nejmenší deformace je v ose tvářeného sochoru a největší pak na nejvzdálenější části sochoru od osy. Průměrnou velikost deformace ε je možné vypočítat podle vztahu: [4]

$$\varepsilon_{VM} = \frac{[tg \gamma_{max} + (0,4 + 0,1 \cdot tg \gamma_{max})]}{2} \quad (4)$$



Obrázek č. 1.1 Schéma metody TE [5]

- a – 1) matrice, b – vzorek
2) průtlačník,
3) prášková část.

ECAP (Equal Channel Angular Pressing/ Extrusion)

U metody ECAP se protlačuje buď válečkový nebo rovnostěnný (kvádrovitý) vzorek kanálkem pod definovaným úhlem s definovanými poloměry zaoblení. V ideálním případě dojde v rohu k čistému smyku v protlačovaném vzorku. Z volby úhlu rohu vyplývají různé stupně deformace. Většinou se používá úhel kanálku od 90° do 120°.

Protlačování se realizuje buď při pokojové teplotě, nebo pro tvrdé materiály při zvýšené teplotě. Velikost deformace vzorku při každém průchodu je závislá na vnitřním a vnějším úhlu kanálů. V případě, že úhel $\psi = 0^\circ$, může být příspěvek stříhového napětí při každém průchodu vypočten podle vztahu:[4]

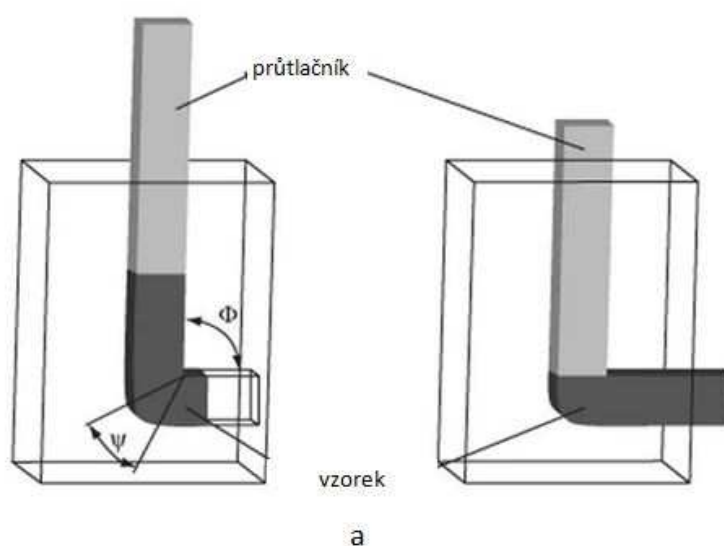
$$\frac{p}{Y} = \Delta \varepsilon_i = \frac{2n}{\frac{\sqrt{3}}{\cot(\frac{\Phi}{2})}} \quad (5)$$

kde: p - tlak,

Y - mez kluzu deformovaného materiálu,

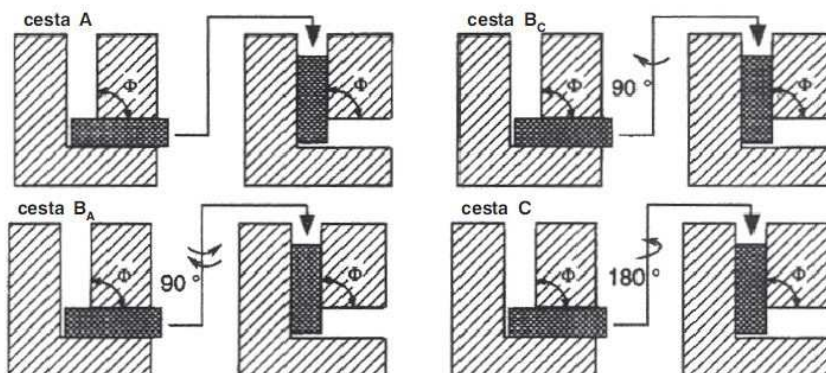
n - je počet průchodů maticí.

Schéma metody ECAP je vyobrazena na obrázku číslo 4.



Obrázek č. 1.2 Schéma metody ECAP

Pro běžně používané úhly $\phi = 90^\circ$ a $\psi = 20^\circ$ se po každém průchodu hodnota vložené deformace ε_{VM} přibližně rovná 1. Výběr deformační cesty a počet průchodů jsou kritickými faktory pro vývoj mikrostruktury a výsledné vlastnosti. Při protlačování vzorku po sobě následujícími průchody je možné jeho rotací po každém průchodu měnit charakteristiky stříhového namáhání. Při kanálovém protlačování je možné použít čtyři různé deformační cesty protlačování uvedené na obrázku č. 4.



Obrázek č. 1.3 Zobrazení cest při procesu ECAP [4]

- Cesta A – sochořem se po každém průchodu neotáčí.
- Cesta BC – sochořem se po každém průchodu otáčí o 90° ve směru hodinových ručiček.
- Cesta BA – sochořem se po každém průchodu otáčí střídavě o 90° ve směru a proti směru hodinových ručiček.
- Cesta C – sochořem se otáčí po každém průchodu v podélné ose o 180° .

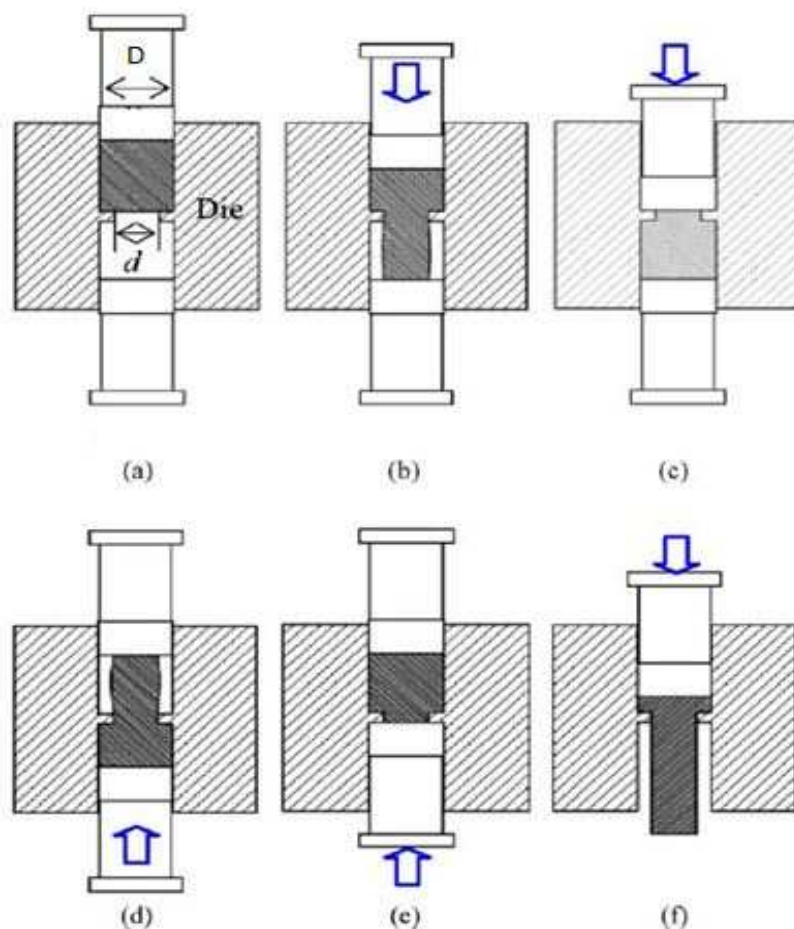
Z analýzy stříhových charakteristik při různých deformačních cestách vyplynulo, že cesta **Bc**, při použití úhlu $\phi = 90^\circ$, je optimální pro vznik ultra-jemných rovnoosých zrn oddělených vysokoúhlými hranicemi.[4]

Metoda ECAP je proces vhodný zejména pro tváření kovů, založený na operacích, které se mnohokrát opakují, dokud není dosaženo celkové hodnoty deformace potřebné pro vznik velmi-jemnozrnné struktury. Původní provedení metody ECAP má určitá omezení, poměrně krátkou délku zpracovávaného kusu, a z toho plynoucí diskontinuita procesu s nízkou účinností a vysokými náklady. Metoda ECAP je ovšem stále ve vývoji. Zlepšené podmínky tření mezi deformovaným sochorem a vnitřním povrchem zápustky vedly k získání ultra jemnozrnné struktury i u těžko tvařitelných sochorů z W a Ti. Byl vyzkoušen i zpětný tlak na tvářený sochor, což významně zvýšilo produktivitu procesu. Vyvinula se rotační zápustka, při jejímž použití není nutné vyjímat a opět zasouvat sochor do zápustky mezi průchody a objevily se i nadějně modifikace ECAP pro plynulou výrobu.[4]

CEC (Cyclic Extrusion–Compression)

Schéma metody cyklického protlačování-stlačování je znázorněno na obr. č. 1.4. Metodu vynalezli J. Richert v roce 1979. Funkce zařízení je založena na tom, že po vytvoření počátečního tlaku na vzorek zůstávají písty v klidové poloze, zatím co rám a s ním spojená zápustka se cyklicky pohybují. Tvářecí síla a napětí v zápustce závisejí do značné míry na tření a se zvětšujícím se třením obě veličiny účinně rostou. Pro provoz zařízení jsou zapotřebí velké a nákladné lisy. Materiál zápustky se obtížně vypořádává s tlaky až 4 GPa, zejména v oblasti tahových napětí. Problém se řeší předpjatými zápustkami. Životnost zápustek je nízká. Metoda CEC je vhodná pro tváření měkkých slitin, např. slitin hliníku. I u těchto materiálů je zapotřebí používat maziva. Dosahuje se ekvivalentní deformace větší než 4. Deformaci ε_{VM} lze vypočítat podle vzorce:[4]

$$\varepsilon_{VM} = n \cdot 4 \cdot \ln \left(\frac{D}{d} \right) \quad (6)$$



Obrázek č. 1.4 Schéma postupu metody CEC

RCS (Repetitive Corrugation and Straightening)

V roce 2001 vynalezli Y. T. Zhu, z Národní laboratoře v Los Alamos SPD metodu založenou na opakovaném zvlňování a rovnání sochoru. Metoda RCS spočívá v ohýbání rovného sochoru nástrojem, jehož povrch je drážkovaný a opětovném vyrovnaní sochoru plochým nástrojem viz obr. č. 1.5. Pro dosažení velkých deformací a požadované mikrostruktury je zapotřebí opakování procesu (obvykle s rotací sochoru podél jeho osy mezi jednotlivými cykly). Velikost deformace ε_{VM} lze vypočítat podle vztahu:

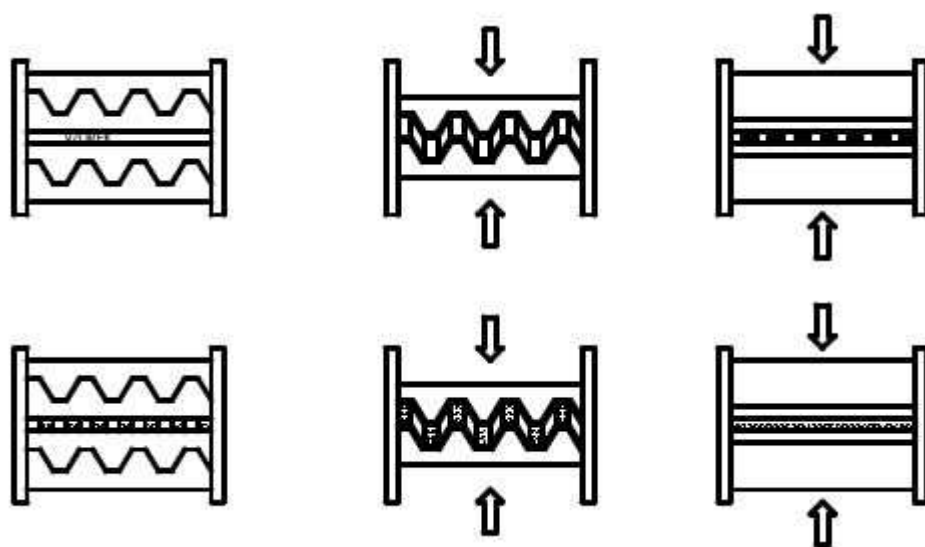
$$\varepsilon_{VM} = \frac{4 \cdot n}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left[\left(\frac{r+t}{r+0.5t} \right) \cdot 24 \right] \quad (7)$$

kde: t - tloušťka vzorku,

r – poloměr zaoblení nástrojů,

n - je počet opakování.

Je třeba poznamenat, že již dříve v roce 1999 navrhl A. K. Ghosh ze stejné laboratoře použití drážkovaných desek pro opakované kování plechů, s rotací plechů mezi cykly. Proces spočíval v indentaci drážek do povrchu plechu a dostal název opakované ražení (MCF – Multipass Coin-Forge).[4]

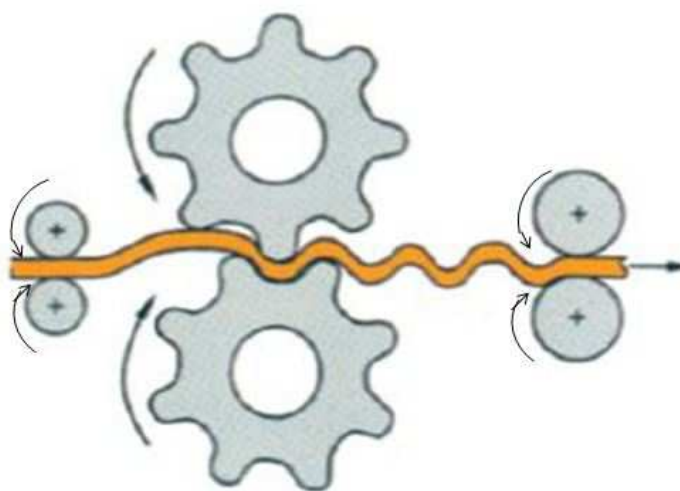


Obrázek č. 1.5 Schéma postupu metody RCS

PLYNULÉ PROCESY

CRCS (Continuous Repetitive Corrugation and Straightening)

Princip této metody je naprosto stejný jako u RCS metody pouze s tím rozdílem, že byl tento proces upraven tak aby bylo možno plynule vyrábět velmi-jemnozrnné struktury pomocí několikanásobné plastické deformace. Pro názornost je tato metoda vyobrazena na obrázku číslo 1.6.



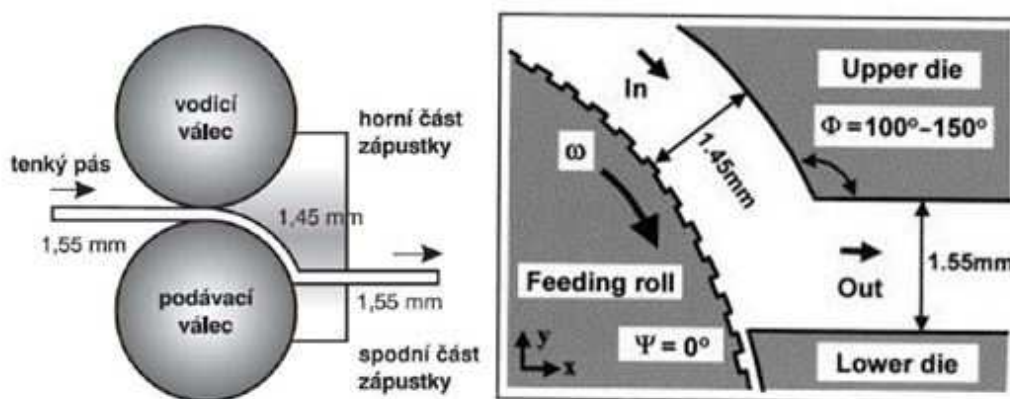
Obrázek č. 1.6 CRSC proces

C2S2 (Continuous Confined Strip Shearing)

Také nazývána DCAP (Dissimilar channel angular pressing) Schéma technologie je znázorněno na obr. č. 1.7. Tato metoda byla vyvinuta korejskými výzkumníky. Je vhodná pro tváření plechů (pásů plechů) velké délky a šířky. Problémem zůstává rovnoměrnost mikrostruktury a vlastností.

C2S2 je proces vhodný zejména pro protlačování tenkých plechů ze slitiny hliníku. Podávací válec a přítlačný válec jsou použity jako podavače plechu. Dva kanály, jejichž tloušťka se vzájemně liší (vnitřní kanál je mírně menší než vnější kanál, viz obr. č. 10) se protínají pod úhlem Φ tzv. nástrojový úhel kanálu, který se obvykle pohybuje v rozmezí od 90° do 150° . Další úhel Ψ definuje oblouk zaoblení na vnějším místě nástrojového úhlu a nazývá se vnější nástrojový úhel, který se pohybuje od 0° do

180°. Posuvová rychlost je závislá na rozměrech plechu a nástrojovém úhlu kanálu. Obvyklá rychlost se pohybuje kolem 5 až 50 m/min. Rozměr nástrojového kanálu a výstupního kanálu je větší než u vstupního kanálu.[4]



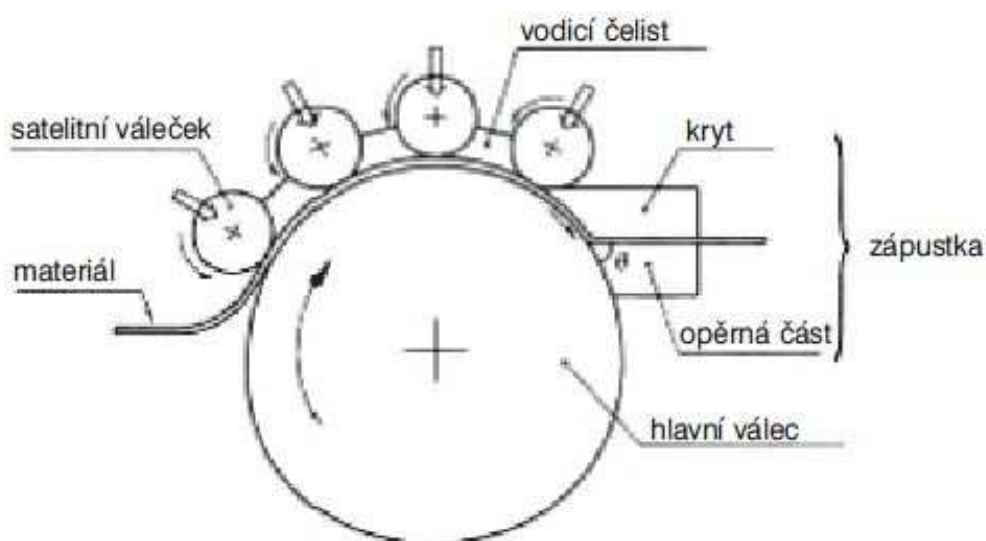
Obrázek č. 1.7 C2S2 proces, vpravo nástrojový detail

Lití tenkých plátů, kombinované s následujícím válcováním, úspěšně vedlo ke snížení ceny výroby plechů a je běžně používáno k výrobě plechů. V posledních letech byly vyvinuty postupy pro snížení úběru tloušťky pásů v jednotlivých průchodech válcovacích stolic. Pásky mohou být vyráběny relativně vysokými rychlostmi, čímž se snižuje celková cena na výrobu UFG materiálů. I přes možnost snižování ceny, došlo ke vzniku dalších problémů. Jedním z nich je složitá kontrola mikrostruktury litých pásů, která je potřebná pro dosažení potřebné pevnosti a tvažitelnosti. Z toho důvodu je další redukce litých pásů válcováním neproveditelná, protože výchozí tloušťka pásu je příliš malá. Proto je kontrola mikrostruktury po válcování někdy velmi obtížná, někdy až nemožná, kvůli tloušťce pásů, která je příliš malá. Podáváním vzorku pomocí podávacího válce, namísto podávání materiálu lisovníkem hydraulického lisu, bylo dosaženo nejen kontinuálního tváření, ale také výroby kovových pásů různých konečných tloušťek.

Conshearing process

Jde v podstatě o metodu ECAP, která je upravená pro plynulé tváření. Metoda je určena především pro tváření tenkých pásů. Použití této metody v poslední době stručně popsal H. Utsunomiya. Plynulé protlačování nastane, když třecí síla působící v mezerách čtyř válečků je větší než síla protlačování. Pro vyvolání tohoto jevu je povrch centrálního válce zdrsněn. Při tváření různých materiálů nebo vzorků různé tloušťky je důležité nalezení optimálního úhlu θ (viz obrázek č. 11). Např. pro 2 mm tlustý vzorek Al slitiny je optimální úhel cca 65° a pro stejně tlustý vzorek oceli 55°. Velikost deformace ε_{VM} se počítá podle vztahu:[4]

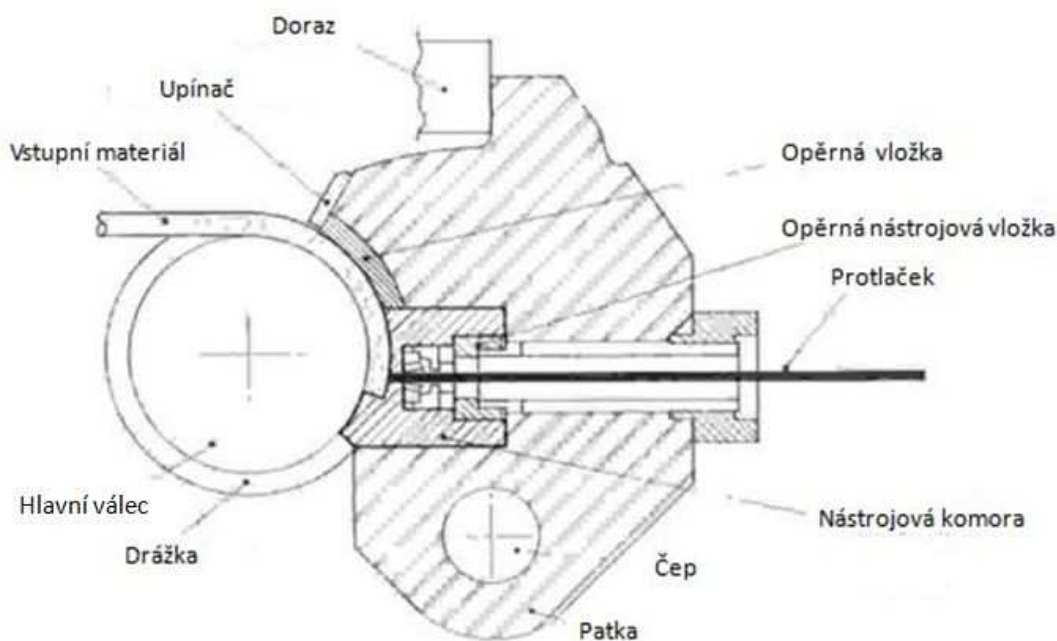
$$\varepsilon_{VM} = \frac{2n}{\sqrt{3} \cdot \left[2 \cot\left(\frac{\theta}{2}\right) + \theta \operatorname{cosec}\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right]} \quad (8)$$



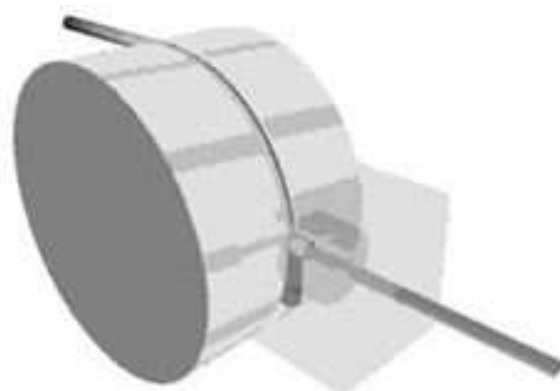
Obrázek č. 1.8 Schéma Conshearing process

CONFORM (Continuous Extrusion Forming)

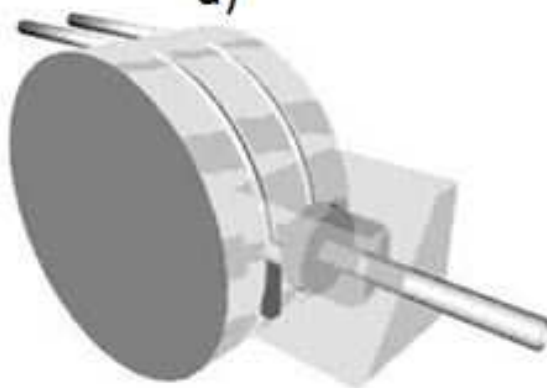
CONFORM je založen na kontinuálním protlačování rotačních i nerotačních profilů a pásu plechů. Je metodou, která byla původně vyvinuta pro plynulé vytlačování, ale na základě problémů s opotřebením nebyla dlouhou dobu použita. Na tuto metodu se v současnosti opět navázalo a opakovaným použitím se zkouší dosáhnout velmi vysokého stupně deformace. Obrázek č. 1.9 ukazuje princip procesu CONFORM. Na obrázku č. 1.10 je zobrazeno několik provedení tohoto procesu. Materiál, ve formě tabulového pásu, je veden "podávacím válcem" s podporou "přítlačné kladky" a tlačén segmentem do "vložky tvářecího nástroje". Intenzivní deformace materiálu přináší požadované zjemnění zrna ve vložce nástroje. Stupeň sklonu pro tuto metodu je 100° – 130° . V jednotlivých průchodech dochází k menšímu stupni deformace, což znamená, že tato metoda požaduje vyšší množství průchodů pro získání stejné UFG struktury, než proces ECAP.



Obrázek č. 1.9 Schéma procesu CONFORM



a)



b)



c)

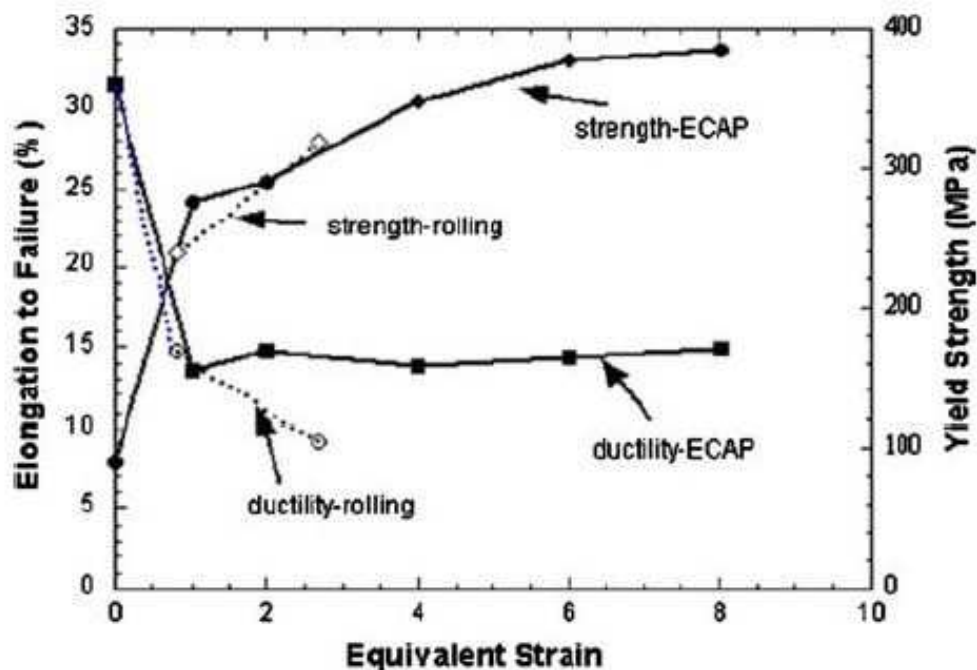
Obrázek č. 1.10 Ukázky metod provedení CONFORM

- a) Jednodrážkové radiální provedení
- b) Dvoudrážkové radiální provedení
- c) Dvoudrážkové tangenciální provedení

1.3. Nové poznatky z vývoje velmi-jemnozrnných materiálů

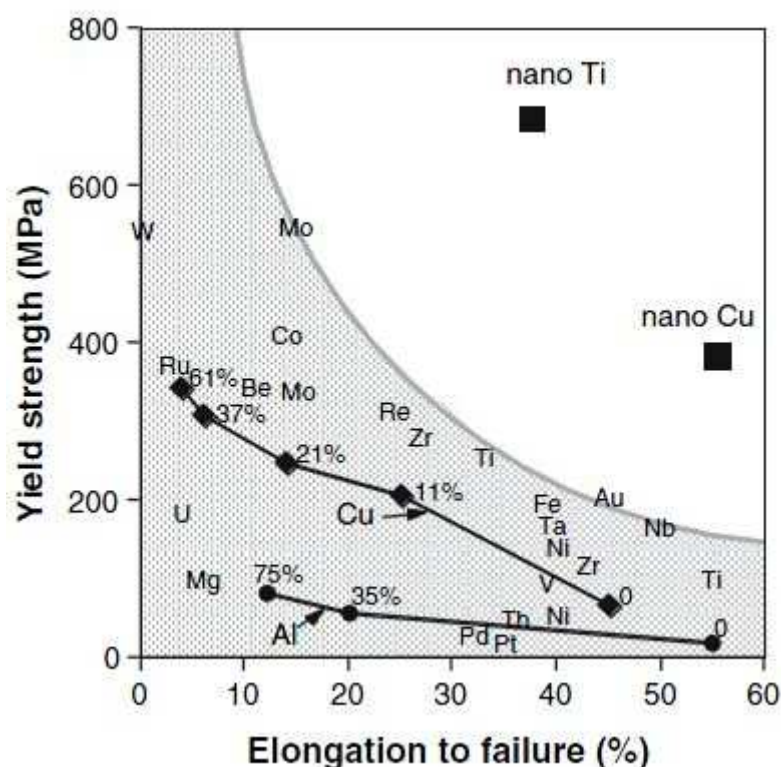
Je dobře známo, že zjemnění zrna napomáhá mechanickým vlastnostem, a tak můžeme očekávat, že jemnozrnné materiály mají velmi vysokou pevnost. Navíc zavedení vysoké hustoty diskolací v SPD procesu může mít za následek dokonce ještě větší tvrdost. Během poslední dekády bylo široce demonstrováno, že zjemňování zrna směrem dolů k manometrickým rozsahům, může vést k velmi vysoké pevnosti v různých kovech a slitinách, ale nicméně tyto materiály trvale vykazují nižší tažnost. Podobné tendence jsou dobře známy pro materiály, které jsou vystaveny těžkému namáhání, jako například válcování, protlačování nebo protahování. Pevnost a tažnost jsou klíčové mechanické vlastnosti pro jakýkoli materiál, ale tyto typické vlastnosti mají protichůdný charakter. Takže materiály mohou být buď pevné, nebo dobře tažné, ale zřídka kdy mají obojí vlastnost.[2]

Důvod této duality tkví v podstatě mechanismu plastické deformace UFG materiálů. Mechanismus plastické deformace spojený s vytvořením a pohybem dislokací, nemusí být efektivní např. u velmi-jemnozrnných nebo u silně zušlechťených mikrostruktur. Tyto materiály vykazují relativně nízkou tažnost, ale dochází u nich k významnému zvýšení pevnosti v porovnání s materiály hrubozrnnými. Například experimenty, které vedly ke srovnání pevnosti a tažnosti hliníkové slitiny 3004, zpracované procesem ECAP (kanálové úhlové protlačování) a válcováním za studena. Jak je vidět na obrázku č. 1.11, mez pevnosti narůstá rovnoměrně se zvyšujícím se ekvivalentním napětím, vneseným do slitiny buď, válcováním za studena anebo procesem ECAP. Nicméně zjevné je také, že celková tažnost vykazuje odlišné trendy pro tyto dvě metody zpracování. Po jenom průchodu metodou ECAP, poměrné prodloužení do porušení nebo tažnost dané slitiny se zmenšila z 32% na 14%. Jelikož následující průchody nástrojem ECAP snižují tažnost pouze mírně, lze proto použít dokonce větších napětí. Oproti tomu válcování za studena tažnost snižuje zpočátku podobnou velikostí, ale následně se tažnost dále snižuje s rostoucím válcovacím napětím, ačkoli pomaleji. Následkem toho byla metoda ECAP uznána jako lepší způsob pro výrobu materiálů, které si udržují svoji tažnost, než válcování za studena.[2]



Obrázek č. 1.11 Porovnání meze pevnosti a tažnosti dosažených metodou ECAP (černé body, zleva doprava odpovídají jednomu až pěti průchodům nástrojem ECAP) ve srovnání s válcováním za studena - slitiny Al 3004.

V této souvislosti, nedávné objevy mimořádně pevných a tažných materiálů s vícezrnou, velmi-jemnou strukturou, produkovány SPD procesem také zasluhují zvýšený zájem (viz obrázek č. 1.12). Uvažujme podrobně rozdílné přístupy, které byly použity v tomto šetření. Klíčem k vyřešení snižování tažnosti je v použití těchto mechanismů – stabilizace a zrovnoměrnění struktury. Základem je proces zrovnoměrnění deformace. Jedná se o dva základní faktory: zpevnění a rychlost zpevnění. Tyto faktory zabraňují koncentraci plastické deformace v lokálních oblastech, které by jinak vedly k nadměrné deformaci, a navození porušení.[2]

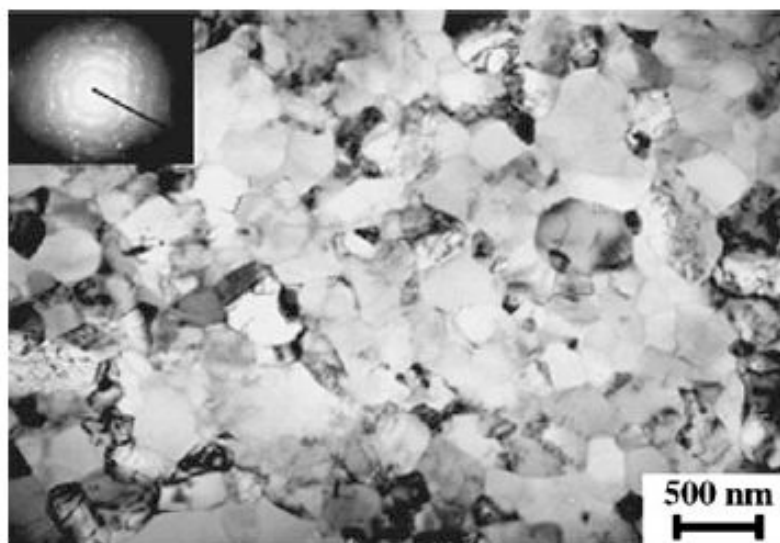


Obrázek č. 1.12 Pevnost a tažnost nanostrukturních kovů, porovnání s jejich hrubozrnnými protějšky. Válcováním za studena se zvyšuje mez kluzu u hliníku a mědi, ale snižuje se jejich tažnost. Tento trend zobrazují dvě linky pro Cu a Al.

Mechanické zpevňování je typicky doprovázeno hromaděním dislokací. Bylo ohlášeno několik strategií, které efektivně blokují a ukládají dislokace uvnitř zrn a následkem toho zvýší mechanické zpevnění. Wang Y [3] vytvořil nanostrukturní měď, válcováním kovu za nízké teploty (teplota kapalného dusíku) a následně zahřál na teplotu kolem 450 K (176°C). Výsledkem byla dvoufázová struktura mikrometrické velikosti zrna, vložená do matrice nanostrukturních zrn. Materiál vykazoval výjimečně vysokou tažnost ale také udržení si vysoké pevnosti. Důvodem pro toto chování materiálu je že, nanokrystalická zrna obstarávají pevnost, větší začleněná zrna stabilizují tahové deformace v materiálu. Další význam ve velikosti zrna přichází z poznatků při práci na zinku, mědi a slitin hliníku. Kromě toho, výzkum mědi ukázal, že dvoufázové struktury mohou zvýšit tažnost nejen během tahových zkoušek ale také během opakované deformace. Tento výzkum je důležitý pro zlepšení únavových vlastností. Další přístup navrhovaný nedávno je založený na vytvoření sekundární fáze složek v nanostrukturní kovové matrici, která modifikuje střižnou rovinu během tažení a

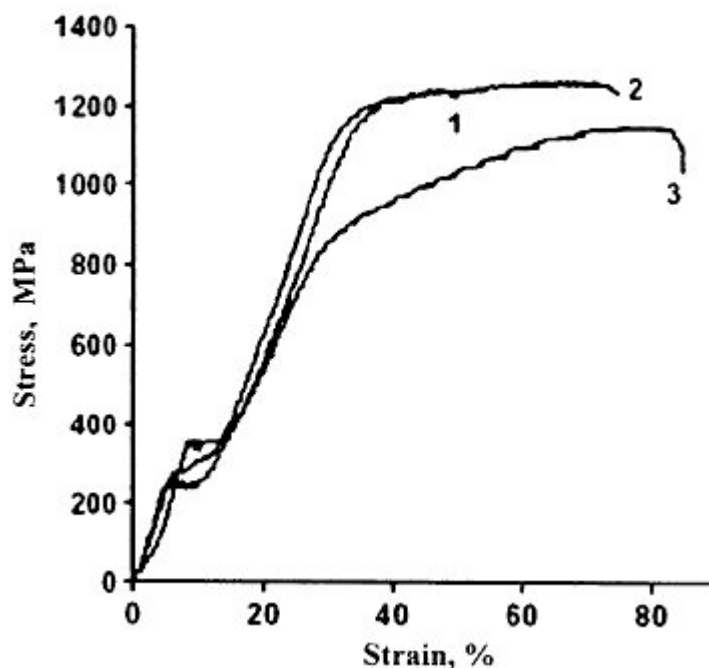
tím zvyšuje tažnost. Nicméně systematické studie obou fázových složek, tvrdé i měkké s různými velikostmi a distribucí zrn je zde žádaný, aby byla zajištěna optimalizace mechanických vlastností. Proto je lepší používat pro zpevňování dvojí struktury v nanoměřítku, než jemnozrnnou strukturu. Přišlo se také na to, že hranice koherentních dvojčat, přičemž vzniká málo defektů ve smyslu mezipovrchové energie (na hranicích zrn), je velice efektivní v blokování dislokací, což je nutně potřebné k přenosu vysokých kluzných napětí přes tyto speciální hranice zrn. Na druhou stranu tyto hranice zrn nepodporují dynamické zotavení, což vede k vzniku všeobecně známých vysokých úhlů mezi hranicemi zrn nebo poruchy mřížky.[2]

Další cestou může být užívání transformačně indukované plasticity (TRIP, transformation-induced plasticity), která je velice dobře stanovena pro konvenční materiály. Zdá se, že TRIP je rozhodující pro výrobu velmi-jemnozrnných materiálů s velikostí zrna několik set nanometrů, při zachování relativně vysokého přetvárného odporu. Užití SPD procesu pomocí HPT (high pressure torsion) při pokojové teplotě, se Titan-Niklové slitiny mohou změnit v amorfni a následným žíháním vzniká velmi-jemná struktura s extrémně malou velikostí zrna mezi 20-30 *nm*. Taková nanokrystalická struktura má silný vliv na martenzitickou přeměnu a tím také na funkční vlastnosti Titan-Niklových slitin. Nicméně tyto slitiny nemohou být zpracovány technologií ECAP za pokojové teploty, kvůli jejich malé tvařitelnosti a proto se objevilo několik prací popisujících výrobu UFG struktur u Ti-Ni slitin za zvýšené teploty. Slitiny podrobený posledním studiím jsou Ti49.8Ni50.2 a Ti49.4Ni 50.6, jejichž teplota pro martenzitickou přeměnu je 75-80°C. Slitina byla v počátečním stavu kalená ve vodě při 800°C po dobu 1 hodiny. Za těchto podmínek je mikrostruktura slitin tvořena vícečetnými zrny s průměrnou velikostí kolem 80 μm . Proces ECAP vede ve značné míře k formování stejnorodé mikrostruktury. Po osmém průchodu ECAP procesu, při 450°C, byla zrna zformována na velmi-jemnozrnnou strukturu s průměrnou velikostí zrna menší než 250 *nm*. Tato mikrostruktura je vyobrazena na obr. č. 1.13. UFG struktura zůstává teplotně stabilní během žíhání při teplotách jdoucích k 500°C. Při srovnání s počátečním hrubozrnným stavem slitiny, vede proces ECAP ke značným změnám v mechanických vlastnostech Ti-Ni slitin, včetně zvýšení koeficientu mechanického zpevnění, mez kluzu a smluvní mez kluzu.[2]



Obrázek č. 1.13 Ukázka mikrostruktury slitiny Ti49.8Ni50.2 po 8 průchodech metodou ECAP při teplotě 450°C

Pro příklad, mez pevnosti R_m slitiny Ti49.8Ni50.2 vzrůstá s rostoucím počtem průchodů metodou ECAP, při teplotě 450°C, a to až na hodnotu 1250 MPa po 8 průchodech. Mez kluzu R_e se zvyšuje více než dvakrát. Tyto výsledky jsou uvedeny na obr. č. 17. Musíme zdůraznit, že mez pevnosti je o 30% vyšší a mez kluzu je dvakrát vyšší než u počátečního hrubozrnného stavu. Následné žíhání při 500°C po dobu jedné hodiny je spojeno s určitou mikrostrukturní obnovou, kdy zrna nerostou, což vede k zvýšení tažnosti. Poměrné prodloužení do přetržení se zvýšilo až o 50%, změny v pevnosti jsou nepatrné (viz křivka 2 v obr. č. 1.14). Takto vysoká pevnost a tažnost v UFG slitinách je přisuzována indukovanému napětí potřebnému k martenzitické přeměně, kterou můžeme pozorovat na začátku namáhání. Tahová zkoušky při zvýšených teplotách potlačily martenzitickou transformaci, a bylo zde pozorováno zvýšení tažnosti.[2]



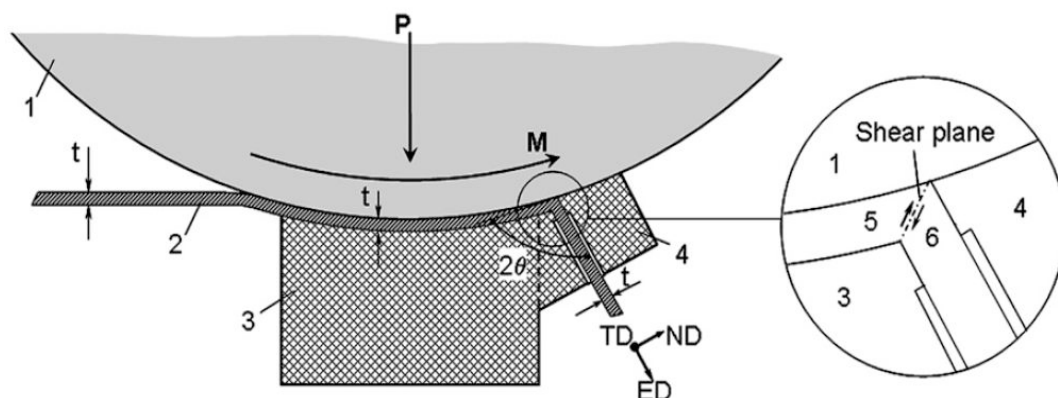
Obrázek č. 1.14 Vztah napětí-deformace pro slitinu Ti49.8Ni50.2 po 8 průchodech metodou ECAP

- 1) 8 průchodů při 450°C
- 2) 8 průchodů při 450°C následně žíhání po dobu 1 hodiny při teplotě 500°C
- 3) 8 průchodů při 450°C následně žíhání po dobu 1 hodiny při teplotě 600°C

Metody vícenásobná plastická deformace (SPD) by si měly klást množství požadavků, pokud mají být vyvíjeny k produkci požadovaných UFG struktur v rozměrných vzorcích. Prvotně je důležité že UFG struktury mají převážně velké úhly hranic zrn, jedině v tomto případě zde mohou probíhat kvalitativní změny v materiálových vlastnostech. Za druhé, tvorba takové struktury musí být homogenní, pro zajištění stability vlastností zpracovávaného materiálu. Za třetí, přestože jsou vzorky vystaveny velkým plastickým deformacím, nesmí obsahovat podstatné mechanické poškození nebo praskliny. Proto je důležité zajistit optimální výrobní postupy k zajištění žádoucích UFG struktur.

Mezi nové techniky, potřebné k tvorbě UFG materiálů, patří kontinuální úhlové protlačování (CFAE – Continuous Frictional Angular Extrusion). Tato metoda byla vyvinuta pro získání velkého množství UFG materiálů s vysokou produktivitou. CFAE proces (obrázek č. 1.15) zahrnuje použití nástrojové sestavy kombinované s několika inovačními kroky, včetně použití třecího řídicího válce, který aplikuje standardní tlak do

tvářeného materiálu, bez jakékoli plastického stlačení a snížení tření uvnitř nástroje. Takto se v kontinuálním zpracování vyskytuje plastická deformace, hlavně v rovině stříhu, u které nedochází ke změně rozměrů výrobku. Velmi-jemnozrnné struktury materiálu lze docílit opakovanými průchody tohoto procesu. Teoreticky tato metoda nabízí množství výhod oproti existujícím metodám. Jsou to tyto, vhodnost pro zpracování velkého množství materiálu (pásky plechu, pruty a tyče), vysoká produktivita a nízká míra odpadu, menší protlačovací síly kvůli minimalizaci tření v nástroji a eliminace plastických deformací v prvním kanále stroje. Válcovací stolice byla přizpůsobena k CFAE zpracování vzorků (pásky plechu viz obr. č. 18). Vrchní válec funguje jako hlavní válec (1), který rotuje k poskytnutí točivého momentu (M) a zároveň ve stejnou dobu aplikuje přítláčnou sílu (P) do tvářeného materiálu. Opěrná vložka (3) spolu s nástrojovou sestavou (4) nahradila spodní válec. Pracovní plocha opěrné vložky odpovídá zakřivení pásu plechu na hlavním válci a vytváří první protlačovací kanál (5). Druhý protlačovací kanál (6) má krátkou drážku ke snížení tření v nehybné nástrojové části. Druhý protlačovací kanál je nakloněn oproti prvnímu kanálu, tento náklon tvoří vnější nástrojový úhel 2θ . Oba kanály mají identický příčný průřez, který je v obr. č. 1.15 označen jako t . [6]



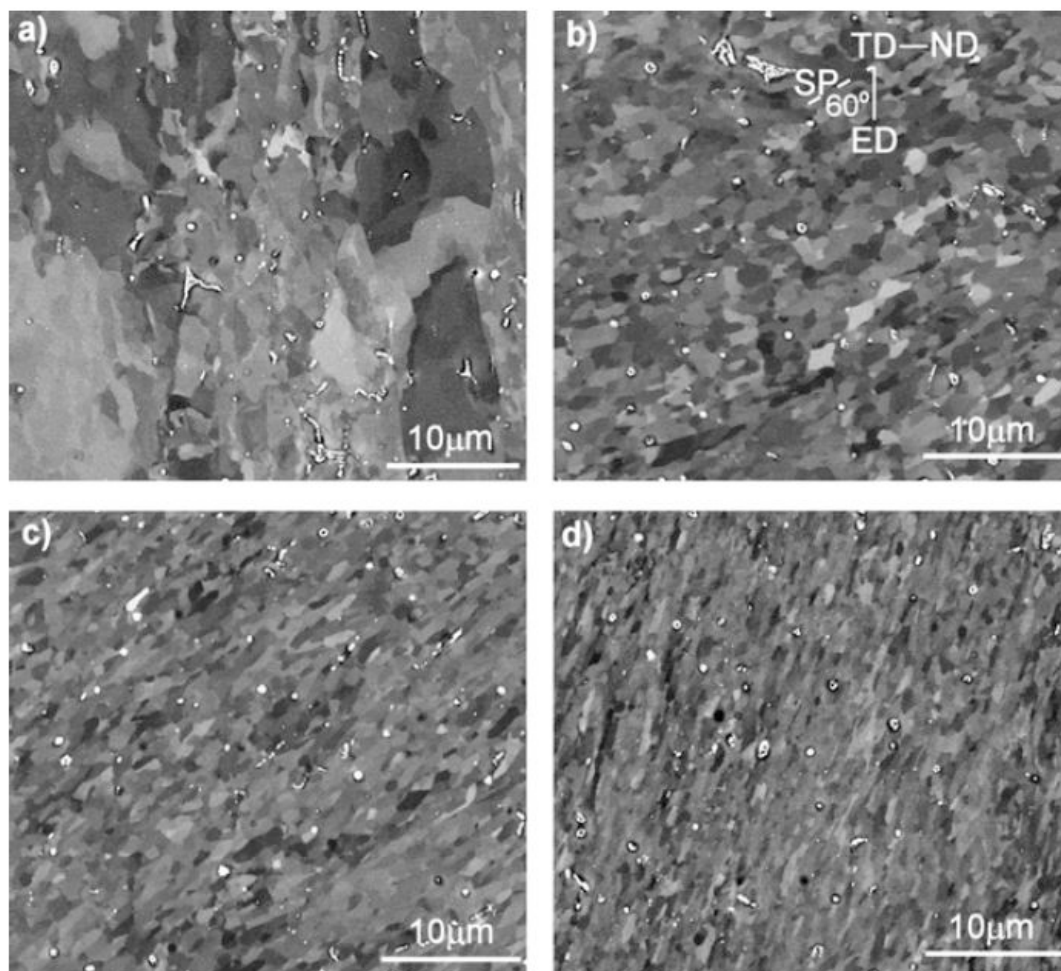
Obrázek č. 1.15 Schéma metody CFAE [6]

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1) Hlavní válec | ED Směr protlačování |
| 2) Vzorek | ND Normálový směr |
| 3) Opěrná vložka | TD Příčný směr |
| 4) Nástrojová sestava | |
| 5) První protlačovací kanál | |
| 6) Druhý protlačovací kanál | |

Obdobně jako je tomu u metody ECAP, i zde má největší vliv na velikost deformace ε_{VM} velikost vnějšího nástrojového úhlu (2θ). Jestliže je tření v druhém protlačovacím kanále zanedbatelné, přítlak (P) je funkcí pevnosti materiálu a velikosti vnějšího nástrojového úhlu:

$$P = 1.15 \cdot \cot\theta \quad (9)$$

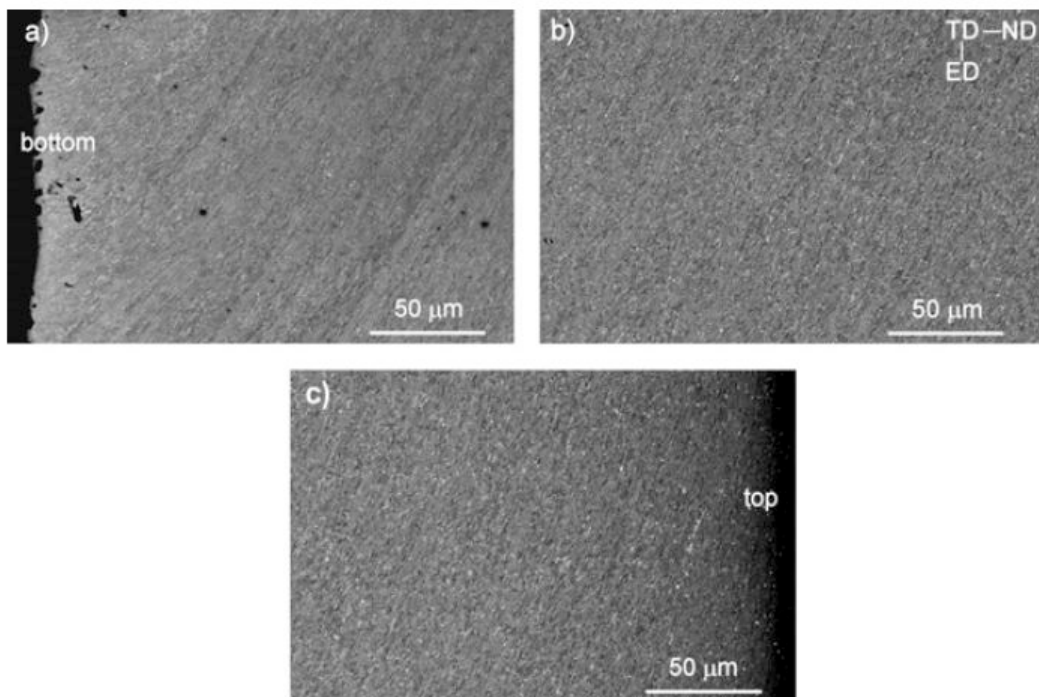
Vzorek pásu plechu o rozměrech 2 x 30 x 2000 mm vyrobeného válcováním za studena komerčního hliníku AA 1050 byl zpracován technologií CFAE. Proces byl uskutečněn při pokojové teplotě a rychlosti protlačování $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [6] Pásky hliníku byly zpracovány až 10 průchody touto metodou, kdy orientace pásů zůstává stejná během celého procesu. Musí být zajištěno, že součinitel tření mezi hlavním válcem a vzorkem musí být významně větší než mezi opěrnou vložkou a vzorkem. Toto je základní požadavek pro funkci procesu. K tomuto zajištění bylo potřeba aplikovat na povrchy opěrné vložky a druhého protlačovacího kanálu diamant ve formě uhlíkového nátěru. Hlavní válec byl mechanicky i chemicky zdrsňen. Jako mazání byla použita kombinace PTFE sprchy a koloidního grafitu přiváděného pouze na spodní plochu vzorku. Horní povrch vzorku, který je v kontaktu s hlavním válcem podstupuje čištění k tomu, aby byla zajištěna dostatečná třecí síla pro vytlačení. Deformační struktury CFAE procesu byly prozkoumány elektrickým polem rastrovacího mikroskopu a s použitím vysokého rozlišení zpětného difrakčního toku elektronů. Na obrázku č. 1.16 je ukázka deformačních struktur získaných CFAE procesem při různé velikosti deformace. Výchozí materiál byl válcován za studena (obr. č. 1.16a). Po jednom průchodu ($\varepsilon_{VM} \sim 0.66$), stejnorodé a jemnější struktury zrn, vytvořené z počátečního hrubozrnného stavu, se skupinami buněk uspořádanými podél roviny stříhu (obr. č. 1.16b). S dalšími průchody se vláknitá deformační struktura začíná formovat podél směru mezi nástrojovou rovinou řezu a směrem protlačování. Jak se napětí zvyšuje, vláknitá struktura se zhutňuje v příčném směru, stávají se více jednotná a otáčí se ke směru protlačování (obr. č. 1.16c a 1.16d). [6]



Obrázek č. 1.16 Ukázka deformačních struktur hliníku AA 1050 docílených metodou CFAE [6]

- a) Počáteční hrubozrnná struktura
- b) Jeden průchod ($\epsilon_{VM} \sim 0.66$)
- c) 4 průchody ($\epsilon_{VM} \sim 2.7$)
- d) 10 průchodů ($\epsilon_{VM} \sim 6.6$)

Deformací bylo zjištěno, že je rozumné zachovat stejnou tloušťku materiálu vzorku a účinky povrchového tření jsou limitovány (obrázek č. 1.17). Pásmo významně ovlivněné třením, s hloubkou $\sim 100\mu m$, bylo pozorováno pouze v místech, kde byl vzorek v kontaktu s povrchem pevné dolní části nástroje, viz obrázek č. 1.17a. Vzorek v kontaktu s povrchem válce (obr. č. 1.17c) má mikrostrukturu téměř totožnou se základní matricí (obr. č. 1.17b). Tento jev je charakteristický pro CFAE proces, díky tomu že spodní povrch vzorků klouže po opěrné vložce, zatímco horní povrch se pohybuje stejnou rychlostí jako hlavní válec.[6]



Obrázek č. 1.17 Ukázka jednotné mikrostruktury po průchodu metodou CFAE

- a) Spodní část vzorku
- b) Střední část vzorku
- c) Horní část vzorku

V rešeršní části této práce bylo vyjmenováno několik metod k získání ultra-jemnozrnných materiálů s využitím vícenásobné plastické deformace. Byly zmíněny, jak dávkové, tak i plynulé a poloplynulé procesy. V další části se bude u zadaných materiálů vyhodnocovat vliv počtu průchodů zařízením DRECE na mechanické vlastnosti. Zařízení DRECE se principiálně velice podobá metodě C2S2, tato metoda byla již popsána výše. Zadané a zkoumané materiály jsou mosaz Cu65Zn35 a uhlíková ocel 11 321.

2. Experimentální ověření protlačování pásu plechu z mosazi a uhlíkové oceli nástrojem DRECE

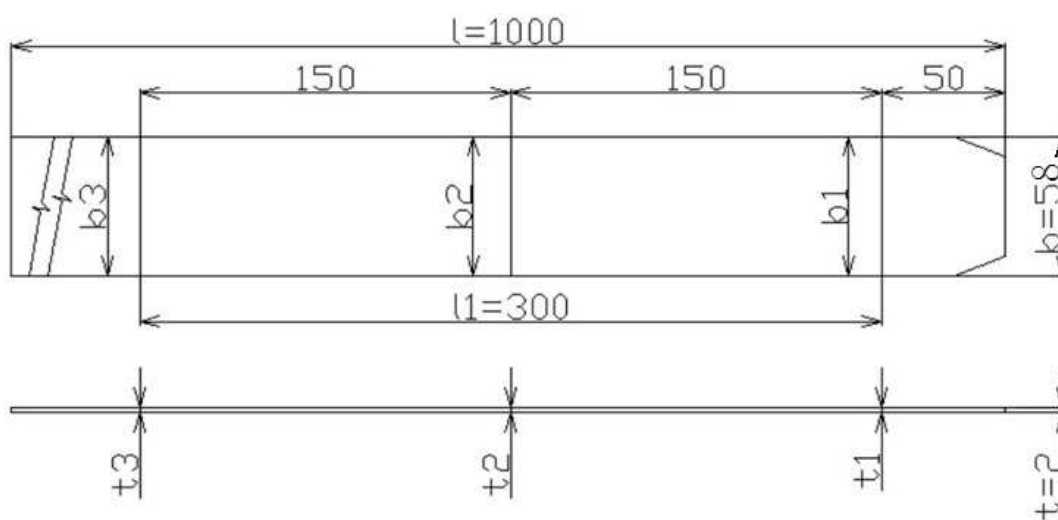
2.1 Popis prototypového zařízení DRECE

Na VŠB – TU Ostrava, Fakultě strojní, katedře mechanické technologie bylo vyvinuto prototypové zařízení označené DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion). Zařízení se skládá z těchto hlavních částí: převodovka typu Nord s elektro – motorem, lamelová spojka, podávací válec a přitlačné válce s regulací přitlačné síly. Obě části nástroje, jak vrchní tak spodní, jsou vyrobeny ze speciální oceli typu Deviar. Pás plechu o rozměrech 59x2x1000 mm je vložen do pracovního prostoru a podávacím válcem v součinnosti s přitlačnými válci je protlačován tvářecím nástrojem, aniž by docházelo ke změně rozměrů příčného průřezu. Při takto prováděné vícenásobné plastické deformaci je dosaženo po určitém počtu průchodů podstatného zjemnění struktury. Všechny experimenty byly provedeny na Mosazi (Cu65Zn35) a uhlíkové oceli (11 321). Mechanické vlastnosti byly určovány z tahové zkoušky a měřením tvrdosti. Tvářecí proces na zařízení DRECE je založen na technologii protlačování s téměř nulovým úběrem tloušťky pásu plechu s konečným cílem dosažení vysokého stupně deformace ve tvářeném materiálu. Prototyp tohoto zařízení je umístěn v laboratoři CPIT VŠB-TU Ostrava, Fakultě strojní. Proces zjemňování struktury je založen na principu metody C2S2, jak bylo popsáno výše.[7] Pohled na prototypové zařízení je na obrázku č. 2.1.



Obrázek č. 2.1 Prototypové zařízení DRECE (a-zařízení v provozu, b-zařízení v rozmontovaném stavu při výměně nástrojů)

Na tomto zařízení je možno provádět protlačování pásu plechu o rozměrech 58x2x1000 mm z různých druhů slitin i oceli. (viz obr. č. 2.2). Na zařízení DRECE byly na počátku použity pásy komerčně čistého hliníku (99,5 Al). Tento materiál se použil pro praktické vyřešení počátečních technologických problémů se zasekáváním a ohýbáním pásů, což vedlo k úpravě geometrie vložky tvářecího nástroje. V dalších fázích experimentu se však s komerčně čistým hliníkem neuvažujeme, protože dosahované hodnoty nárůstu mechanických hodnot nebyly považovány za dostatečné. Dosažené výsledky jsou vázány na rychlou stabilizaci struktury po tvářecím procesu, což vyžaduje dovybavení pracoviště o žíhací pec.[7]



Obrázek č. 2.2 Schéma tvaru pásu plechu s vyznačenými místy měření šířky a tloušťky

Obecně z měření vyplívá, že s nárůstem počtu průchodů dochází k malému zvětšení šířky plechu (b_1 , b_2 , b_3) na úkor zmenšení jeho tloušťky (t_1 , t_2 , t_3). Daný jev je shodný s výsledky dosaženými matematickou simulací.

2.2 Popis materiálů pro zpracování zařízením DRECE

Mosaz (Cu65Zn35)

Mosaz se používá již od starověku, ale ve velmi omezeném množství, protože ji bylo těžké vyrobit. Vyráběla se žíháním mědi s oxidem zinečnatým na dřevěném uhlí. Mosaz byla velmi drahá, používala se na výrobu mincí a šperků. Společným tavením

zinku a mědi se ji podařilo vyrobit až roku 1781. Díky svým chemickým a fyzikálním vlastnostem se i dnes používá v mnoha průmyslových odvětvích. Hustota mosazi 8400 až 8700 kg.m⁻³. Teplota tavení je 850-920°C. Běžná mosaz je poměrně měkký kov s jasně zlatavou barvou a s poměrně nízkou chemickou odolností vůči kyselinám a louhům.

Základní rozdělení mosazí:

Mosazi na odlitky

Mosazi ke tváření

Mosazi na odlitky: Jde zpravidla o mosazi heterogenní. Obsahují 45 - 80% Cu a často kromě Zn ještě další příměsi 2 - 3 % Pb, Si, Al, aj. Jsou velice pevné, ale ostatní mechanické vlastnosti jsou horší, proto se používají podstatně méně než mosazi tvářené. Vyrábí se z nich méně namáhaná kluzná ložiska a pouzdra, dají se odlévat do písku, kokil. Přídavkem dalších kovů získají specifické vlastnosti (zvýšenou pevnost, korozivzdornost).

Mosazi ke tváření: Jsou převážně jednofázové. Mají výborné mechanické vlastnosti, výbornou tažnost, houževnatost a poměrně vysokou pevnost. Vyrábí se z nich dráty, pásy, trubky, plechy, apod. Tyto polotovary se zpracovávají obráběním, tvářením za studena nebo za tepla – tažením, lisováním, tlačením a ražením. Pro dosažení lepších vlastností jsou mosazi legovány dalšími kovy, potom hovoříme o vícesložkových mosazích. Právě do této skupiny patří námi zkoumaná mosaz Cu65Zn35 dle normy ČSN EN 42 3265. Mechanické vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce č. 2.1.

Tabulka č. 2.1 Základní mechanické vlastnosti mosazi Cu65Zn35

NÁZEV	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	230 – 240
Modul pružnosti v tahu E	[MPa]	130000
Mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	75 – 80
Hustota	[g/ cm ³]	8 650
Tvrдость (HB10)	—	75 – 80

Uhlíková ocel (11 321 dle ČSN 41 1321, dle EN DC01)

Obecně oceli třídy 11 jsou uhlíkové (nelegované) konstrukční oceli se zaručenou čistotou, zaručenou minimální pevností v tahu, mezí kluzu a tažností, hutě je obvykle dodávají ve tvaru tyčí různých profilů, drátů, plechů, trubek, pásů, popř. výkovků; některé jsou dodávány jako hlubokotažné plechy (např. 11 320) na součásti karosérií, na nádobí apod., nebo jako kotlové plechy (např. 11 364, 11 474) se zaručenou svařitelností. Pro méně namáhané strojní součásti, jako např. čepy, hřídele, menší ozubená kola aj., jsou vhodné oceli s pevností řady 37 (370 MPa), např. 11 373 nebo řady 42 (420 MPa), např. 11 423; dají se svařovat a jsou vhodné pro svařované konstrukce. Pro náročnější a více namáhané strojní součásti jsou vhodné oceli vyšších pevností, např. 11 600, 11 700 a 11 800, některé (např. 11 110) jsou zvláště vhodné pro obrábění (oceli automatové) a hutě je dodávají v tyčích tažených za studena

Ocel 11 321 je nelegovaná, jakostní, vhodná k tváření (válcování) za studena, k středně hlubokému tažení, lakování, pokovování v tavenině, potisku a smaltování - jen u neuklidněné oceli. Svařitelnost zaručená v závislosti na rozměrech polotovaru.

Tabulka č. 2.2 Základní mechanické vlastnosti oceli 11 321

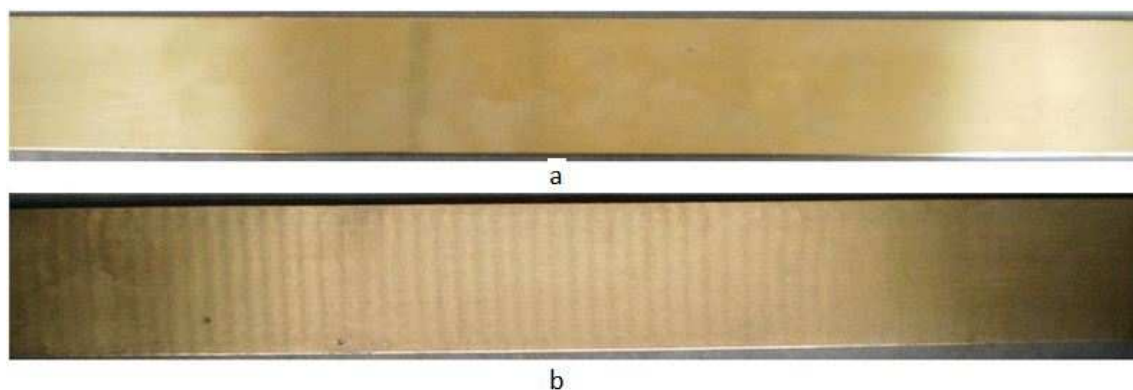
NÁZEV	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	280 – 380
Mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	235
Tažnost A_{80}	[%]	29

3. Vliv počtu průchodů a tepelného zpracování na velikost mechanických vlastností u plechu z mosazi.

Experimentálně byl ověřován plech z mosazi Cu65Zn35 (s rozměry dle obr. č. 2.2) a to v několika variantách. Jako první možnou variantou bylo protlačení plechu zařízením DRECE ve výchozím stavu (komerční výroba), dále potom další dvě varianty s tepelnou úpravou. První z nich je protlačení mosazného plechu zařízením DRECE (2. a 4. průchody) a následné vyžhání při teplotě 450°C po dobu 15min. Jako poslední varianta tepelného zpracování bylo zvoleno opět nejprve protlačení zařízením DRECE (dva až šest průchodů) a následné žhání při 200°C, výdrž na této teplotě 15min a ochlazení na vzduchu. Dále byly všechny takto tepelně zpracované vzorky znovu protlačeny zařízením DRECE na celkový počet 8 průchodů.

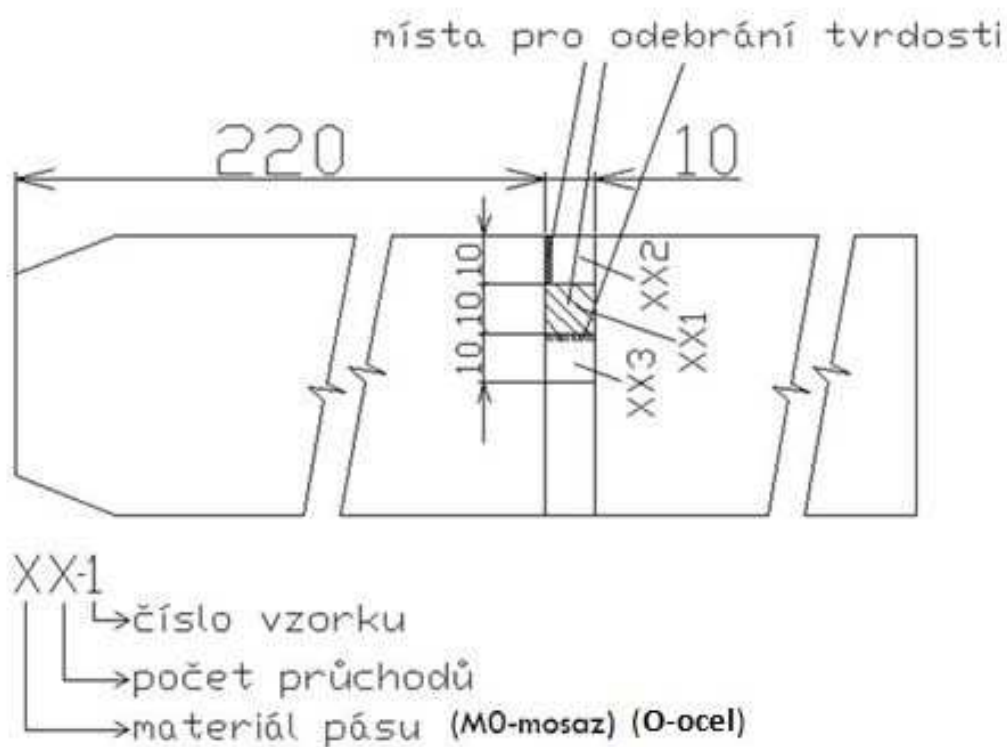
3.1 Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi bez tepelného zpracování na mechanické vlastnosti.

Zařízením DRECE bylo protlačena mosaz Cu65Zn35 (materiál byl popsán v kapitole 2.2) 58x2x1000 mm (šířka (b) x tloušťka (t) x délka (l)). Ukázka vzorků je na obrázku č. 3.1.



Obrázek č. 3.1 Pás plechu z mosazi Cu65Zn35 (a-výchozí stav, b-po 4 průchodech zařízením DRECE)

Vzorky pro zkoumání tvrdosti jsou odebírány tak, jak je vyobrazeno na obr. č. 3.2. Zkouška je provedena dle ČSN EN ISO 6507-1. Z místa pro odebrání tvrdosti (HV5) označené jako XX-1 budeme brát naměřené hodnoty z povrchu vzorku. U vzorku s označením XX-2 byly hodnoty tvrdosti měřeny z vnitřní strany vzorku (příčný řez vzorku). U XX-3 byla vyhodnocována vnější strana vzorků (podélný řez plechu).



Obrázek č. 3.18 Schéma odběru vzorků pro zkoušku tvrdosti

Provedení experimentu.

Nejprve byly porovnány změny rozměrů při protlačovacím procesu u plechu z mosazi, bez tepelného zpracování. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 3.1. Všechny rozměry (délka-l, šířka-b, tloušťka-t) byly změřeny v místech vyznačených na obrázku č. 2.2.

Tabulka č. 3.1 Tabulka naměřených hodnot pro tepelně nezpracovaný mosazný plech

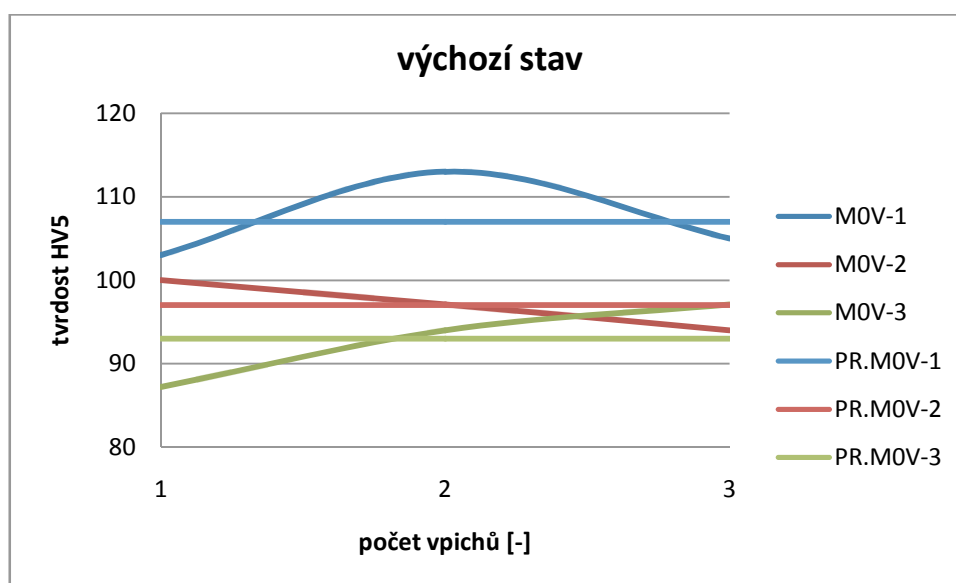
průchod	otočení [°]	l x š x t [mm]							mazání	tlak [bar]	přítlak [Nm]
		l ₁	b ₁	b ₂	b ₃	t ₁	t ₂	t ₃			
0		300	58,34	58,16	58,01	1,79	1,75	1,75			
1	0	297	58,54	58,35	58,21	1,71	1,81	1,81	ano	110	40
2	180	293	58,69	58,48	58,41	1,81	1,82	1,87	ano	110	40
3	0	289	58,82	58,60	58,59	1,83	1,82	1,89	ano	110	40
4	180	285	58,89	58,84	58,70	1,87	1,85	1,86	ano	130	40
5	0	283	59,22	59,03	58,90	1,85	1,85	1,85	ano	130	40
6	180	282	59,38	59,14	59,11	1,85	1,82	1,83	ano	130	40

Všechny změřené hodnoty v tabulce č. 3.1 slouží pouze k představě o změně rozměrů plechu Cu65Zn35 při průchodech zařízeními DRECE. Z hodnot je patrné, že pás plechu se zkracuje o maximální hodnotu 18 mm, na úkor rozšíření plechu. Z původních 58,34 mm na 59,38 mm.

Hodnoty tvrdostí dle Vickerse (HV5) pásu plechu z mosazi Cu65Zn35 bez tepelného zpracování. V tabulce č. 3.2 jsou uvedeny hodnoty mosazi ve výchozím stavu.

Tabulka č. 3.2 Výchozí hodnoty tvrdostí pro mosaz Cu65Zn35 (x = průměrná hodnota)

vzorek	měření	tvrdost	x = 107	vzorek	měření	tvrdost	x = 97	vzorek	měření	tvrdost	x = 93
MOV-1	1	103		MOV-2	1	100			1	87,2	
	2	113			2	97,1		MOV-3	2	94	
	3	105			3	94			3	97,1	



Graf č. 3.1 Dosažené hodnoty tvrdosti mosazi u výchozího stavu (PR-průměrná hodnota)

Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

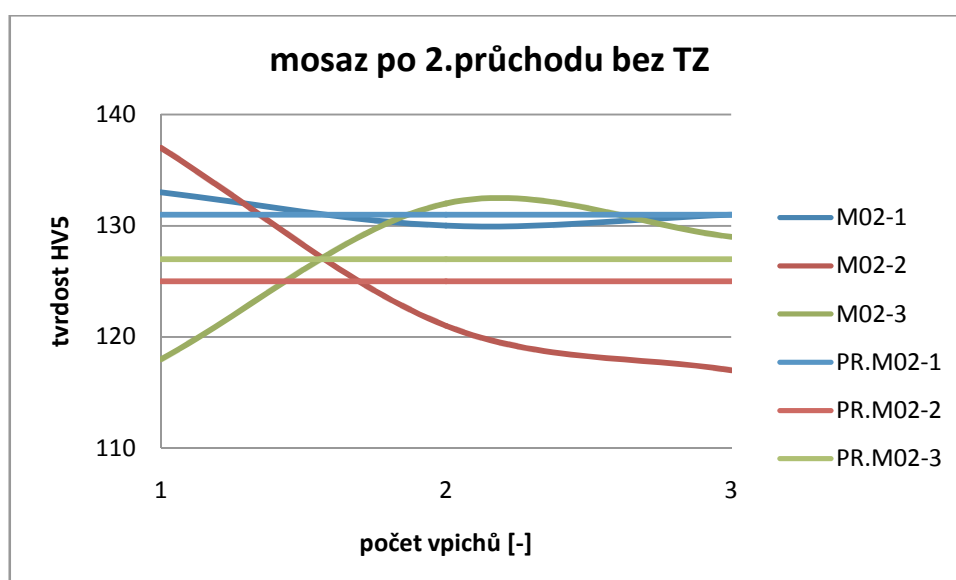
Z tabulky i grafu je patrné, že se bylo dosaženo největší hodnoty tvrdosti na povrchu pásu plechu-113 HV5

3.2 Vliv počtu průchodů nástrojem DRECE na změnu tvrdosti a mechanických vlastností u mosazi bez tepelného zpracování.

V tabulce č. 3.3 jsou uvedeny hodnoty pro mosaz po 2 průchodech zařízením DRECE.

Tabulka č. 3.3 Hodnoty tvrdostí pro mosaz Cu65Zn35 po druhém průchodu zařízením DRECE (x = průměrná hodnota)

vzorek	měření	tvrdost	x = 131	vzorek	měření	tvrdost	x = 125	vzorek	měření	tvrdost	x = 127
M02-1	1	133		M02-2	1	137		M02-3	1	118	
	2	130			2	121			2	132	
	3	131			3	117			3	129	



Graf č. 3.2 Dosažené hodnoty tvrdosti pro mosaz CU65Zn35 po druhém průchodu zařízením DRECE (PR-průměrná hodnota)

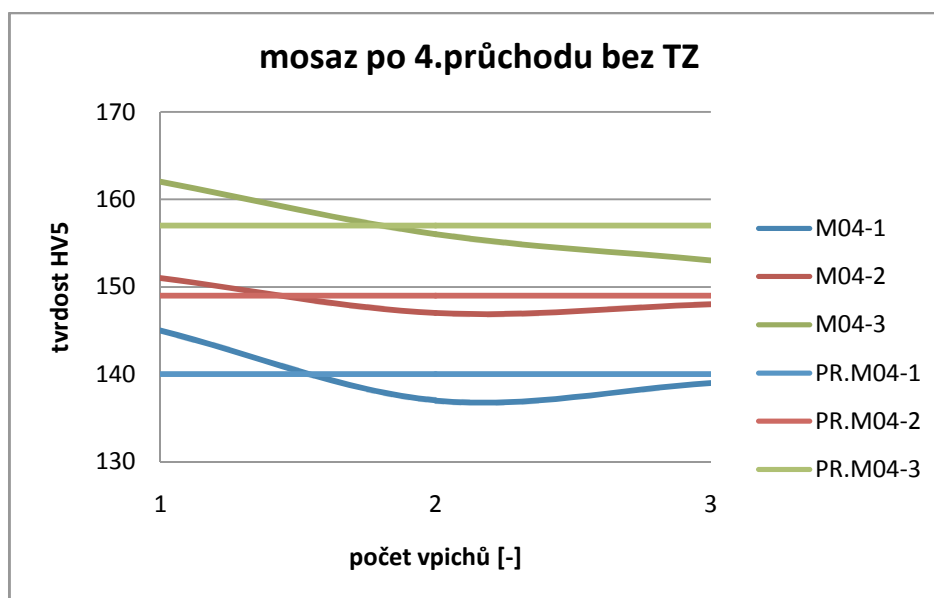
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Z grafu a tabulky je patrné, že všechny hodnoty tvrdosti se do jisté míry ustalují ve všech měřených místech, oproti původnímu stavu, kde největší tvrdost HV5 byla naměřena na povrchu vzorku. Největší hodnota tvrdosti, se vyskytuje v příčném průřezu mosazného plechu, její velikost je 137 HV5, tato hodnota se ovšem dosti odchyluje od dalších dvou změřených. Tuto skutečnost lze vysvětlit výskytem lokálního defektu.

V tabulce č. 3.4 jsou uvedeny hodnoty pro mosaz po 4 průchodech zařízením DRECE.

Tabulka č. 3.4 Hodnoty tvrdostí pro mosaz Cu65Zn35 po čtvrtém průchodu zařízením DRECE

vzorek	měření	tvrdost	x = 140	vzorek	měření	tvrdost	x = 149	vzorek	měření	tvrdost	x = 157
M04-1	1	145		M04-2	1	151		M04-3	1	162	
	2	137			2	147			2	156	
	3	139			3	148			3	153	



**Graf č. 3.3 Dosažené hodnoty tvrdosti pro mosaz CU65Zn35 po čtvrtém průchodu zařízením DRECE
(PR-průměrná hodnota)**

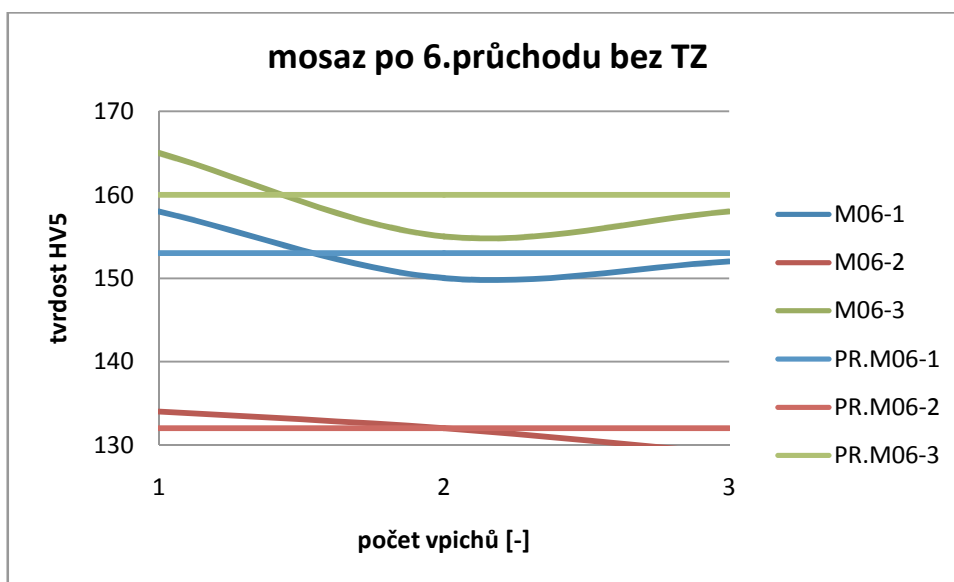
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Nejvyšší hodnota tvrdosti pro mosaz Cu65Zn35 po 4 průchodu zařízením DRECE byla změřena u podélného řezu – 162 HV5.

V tabulce č. 3.5 jsou uvedeny hodnoty pro mosaz po 6 průchodech zařízením DRECE.

Tabulka č. 3.5 Hodnoty tvrdostí pro mosaz Cu65Zn35 po šestém průchodu zařízením DRECE

vzorek	měření	tvrdost		vzorek	měření	tvrdost		vzorek	měření	tvrdost	
M06-1	1	158	x = 153	M06-2	1	134	x = 132		1	162	x = 157
	2	150			2	132		M06-3	2	156	
	3	152			3	129			3	153	



Graf č. 3.4 Dosažené hodnoty tvrdosti pro mosaz CU65Zn35 po šestém průchodu zařízením DRECE (PR-průměrná hodnota)

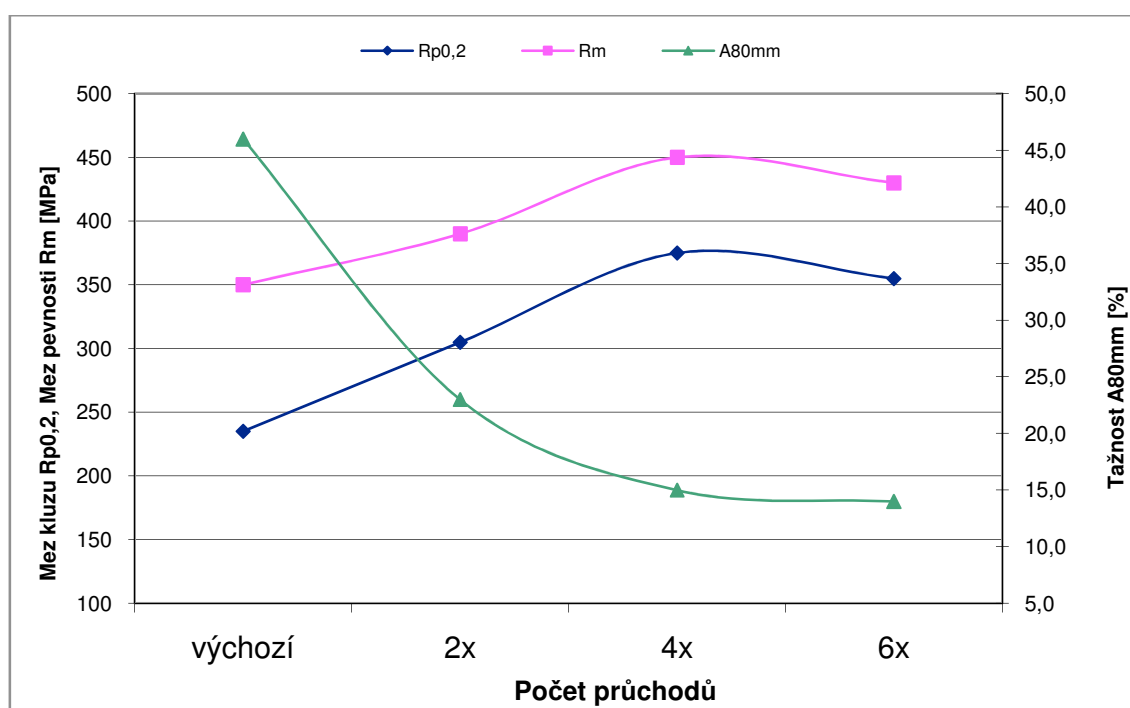
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

S každým následujícím průchodem mosazného plechu zařízením DRECE jeho tvrdost poměrně plynule narůstá (viz grafy č. 3.1 až 3.4). Největší hodnota tvrdosti byla změřena v příčném řezu daného pásu plechu a to 165 HV5. Oproti původnímu stavu vzrostla tvrdost více než o 50%.

Byly zjišťovány hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnosti A_{80} . V tabulce č. 3.6 a grafu č. 3.5 jsou uvedeny změny jejich velikosti v závislosti na počtu průchodů.

Tabulka č. 3.6 Dosažené hodnoty mechanických vlastností pásu plechu z mosazi Cu75Zn35

Počet průchodů	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
výchozí	235	350	46,0
2x	305	390	23,0
4x	375	450	15,0
6x	355	430	14,0



Graf č. 3.5 Zobrazení meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti mosazi Cu75Zn35 bez tep. zpracování

Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Z tabulky č. 3.6 i grafu č. 3.5 je znát, že mez kluzu i mez pevnosti do 4. průchodu roste téměř exponenciálně, u 6. průchodu její hodnota mírně klesá. Největší hodnota meze kluzu je 375 MPa, mez pevnosti má hodnotu 450 MPa. Oproti tomu tažnost se snižuje, a to celkem velmi významně do 4. průchodu, následně její hodnota stagnuje. Z původních 45% se snížila až na hodnotu 14%. Z hlediska efektivity procesu zjemňování zrna se jeví provedení 4 průchodů nástrojem DRECE, jako postačující z hlediska dosažených mechanických vlastností. Daný poznatek bude nutno ověřit provedením dalších experimentálních prací.

3.3 Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi s tepelným zpracováním (450°C/15 min) na mechanické vlastnosti.

Opět byly porovnány změny rozměrů při protlačovacím procesu u plechu z mosazi s tepelným zpracováním, jak bylo popsáno výše. Změřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 3.7. Všechny rozměry (délka-l, šířka-b, tloušťka-t) byly změřeny v místech vyobrazených na obrázku č. 2.2.

Tabulka č. 3.7 Tabulka naměřených hodnot pro tepelně zpracovaný (450°C/15 min) mosazný plech

průchod	otočení [°]	l x š x t [mm]							mazání	tlak [bar]	přítlak [Nm]
		l ₁	b ₁	b ₂	b ₃	t ₁	t ₂	t ₃			
0		300	58,34	58,16	58,01	1,79	1,75	1,75			
1	0	297	58,54	58,35	58,21	1,71	1,81	1,81	ano	110	40
2	180	293	58,69	58,48	58,41	1,81	1,82	1,87	ano	110	40
Žiháno (450°C/15 min)											
3	0	283	59,00	58,93	58,90	1,87	1,86	1,85	ano	130	40
4	180	280	59,38	59,14	59,11	1,85	1,84	1,83	ano	130	40

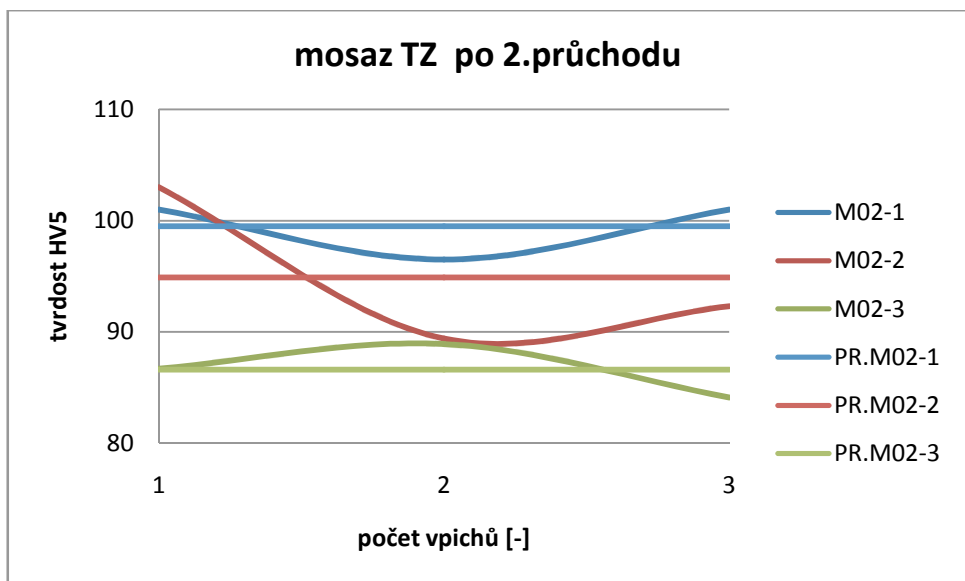
Rozměry mosazného plechu Cu65Zn35 se po tepelném zpracování mění velmi podobně jako u tepelně neupravené mosazi. Celková délka se snižuje, plech se rozšiřuje. V tomto případě se plech zkrátil o 20 mm. Šířka průměrně vzrostla o 1 mm.

Hodnoty tvrdostí dle Vickerse (HV5) pásu plechu z mosazi Cu65Zn35 tepelně zpracovaného dle první varianty - viz kapitola 3 (2., 4., 6. průchod a následné žihání při 450°C/15 min.).

V tabulce č. 3.8 jsou uvedeny hodnoty tvrdosti mosazi Cu65Zn35 po tepelném zpracování (450°C/15 min.)

Tabulka č. 3.8 Hodnoty tvrdostí mosazi Cu65Zn35 po 2průchodu a tepelně zpracované (450/15 min.)

vzorek	měření	tvrdost	x = 99,5	vzorek	měření	tvrdost	x = 94,9	vzorek	měření	tvrdost	x = 86,6
M02-1	1	101		M02-2	1	103		M02-3	1	86,7	
	2	96,5			2	89,4			2	88,9	
	3	101			3	92,3			3	84,1	



Graf č. 3.6 Dosažené hodnoty tvrdosti pro mosaz Cu65Zn35 tepelně zpracovanou při 450°C (PR-průměrná hodnota)

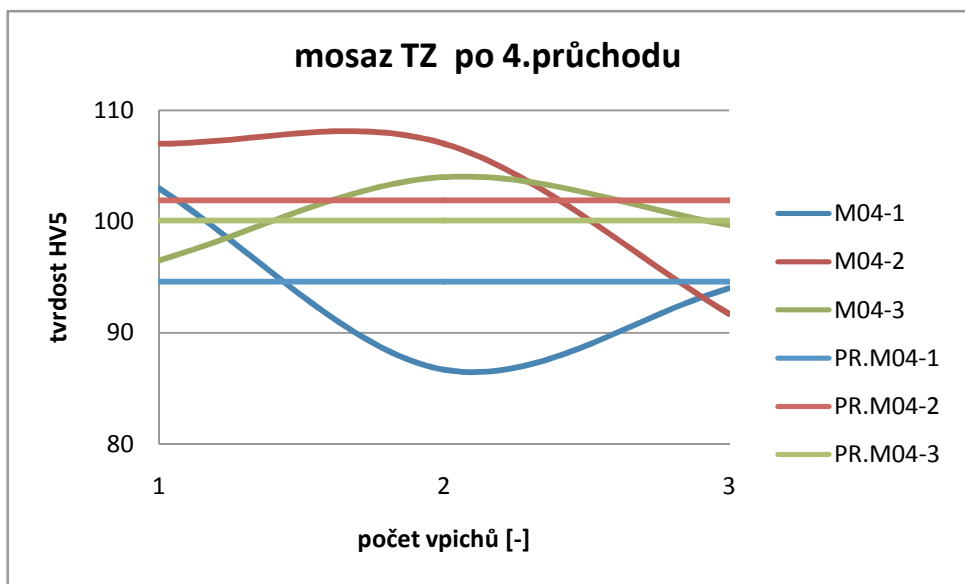
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Po tepelném zpracování a dvojím průchodu mosazi zařízením DRECE se hodnoty tvrdosti příliš neliší od výchozího stavu. Největší hodnota tvrdosti změřena na povrchu vzorku je 103 HV5, ale toto číslo se celkem liší od ostatních dvou změřených ve stejném průřezu vzorku.

V tabulce č. 3.9 jsou uvedeny hodnoty pro mosaz Cu65Zn35 po tepelném zpracování (450°C/15 min.).

Tabulka č. 3.9 Hodnoty tvrdostí mosazi Cu65Zn35 tepelně zpracované (450°C/15 min.)

vzorek	měření	tvrdost	x = 94,6	vzorek	měření	tvrdost	x = 101,9	vzorek	měření	tvrdost	x = 100,1
M04-1	1	103		M04-2	1	107		M04-3	1	96,5	
	2	86,7			2	107			2	104	
	3	94			3	91,7			3	99,7	



Graf č. 3.7 Dosažené hodnoty tvrdosti pro mosaz Cu65Zn35 tepelně zpracovanou při 450°C (PR-průměrná hodnota)

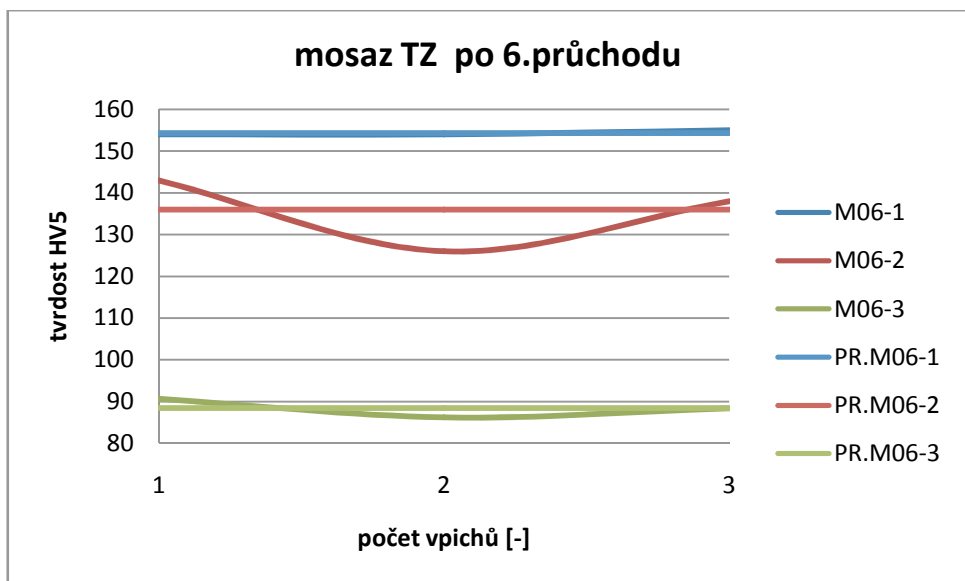
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Ani po 4. průchodu tepelně zpracovaná mosaz nijak extrémně netvrdne. Až na nejvyšší hodnotu 107 HV5 u příčného řezu vzorkem, která je mírně vyšší než hodnota po druhém průchodu zařízením DRECE.

V tabulce č. 3.10 jsou uvedeny hodnoty pro mosaz po tepelném zpracování a šesti průchodech zařízením DRECE.

Tabulka č. 3.10 Hodnoty tvrdostí mosazi Cu65Zn35 tepelně zpracované a následně 6 protlačené zařízením DRECE

vzorek	měření	tvrdost	x = 154,3	vzorek	měření	tvrdost	x = 136	vzorek	měření	tvrdost	x = 88,4
M06-1	1	154		M06-2	1	143		M06-3	1	90,6	
	2	154			2	126			2	86,2	
	3	155			3	138			3	88,3	



Graf č. 3.8 Dosažené hodnoty tvrdosti pro mosaz CU65Zn35 tepelně zpracovanou při 450°C (PR-průměrná hodnota)

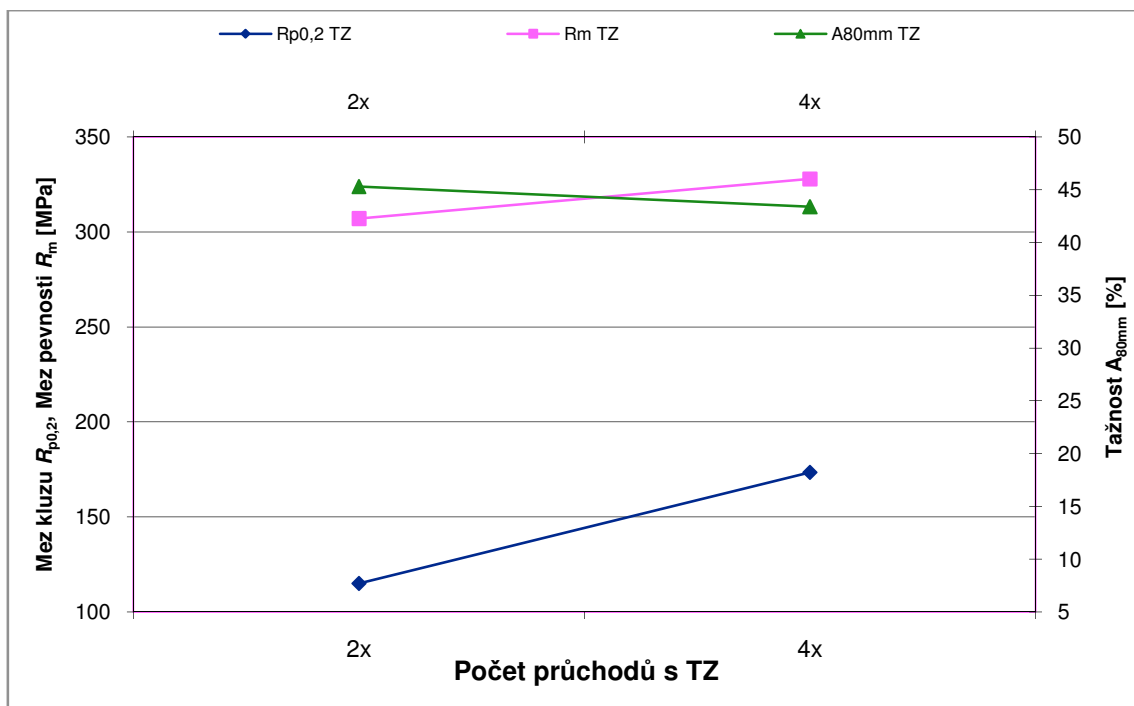
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Tepelně zpracovaná mosaz zvyšuje dosti výrazně svoji tvrdost až při šestém průchodu zařízením DRECE. V porovnání s šestým průchodem tepelně nezpracované mosazi Cu65Zn35 jsou hodnoty tvrdosti téměř totožné, jak na povrchu vzorku, tak v příčném řezu. Rozdíl je patrný pouze u podélného průřezu vzorkem, kde je hodnota tvrdosti výrazně menší než u tepelně nezpracované mosazi, a to 90.6 HV5.

Opět byly vyhodnoceny i další mechanické vlastnosti z mosazi Cu65Zn35, mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{80} . V tabulce č. 3.11 jsou uvedeny hodnoty všech tří zmíněných veličin a také jsou vyneseny do grafu č. 3.9.

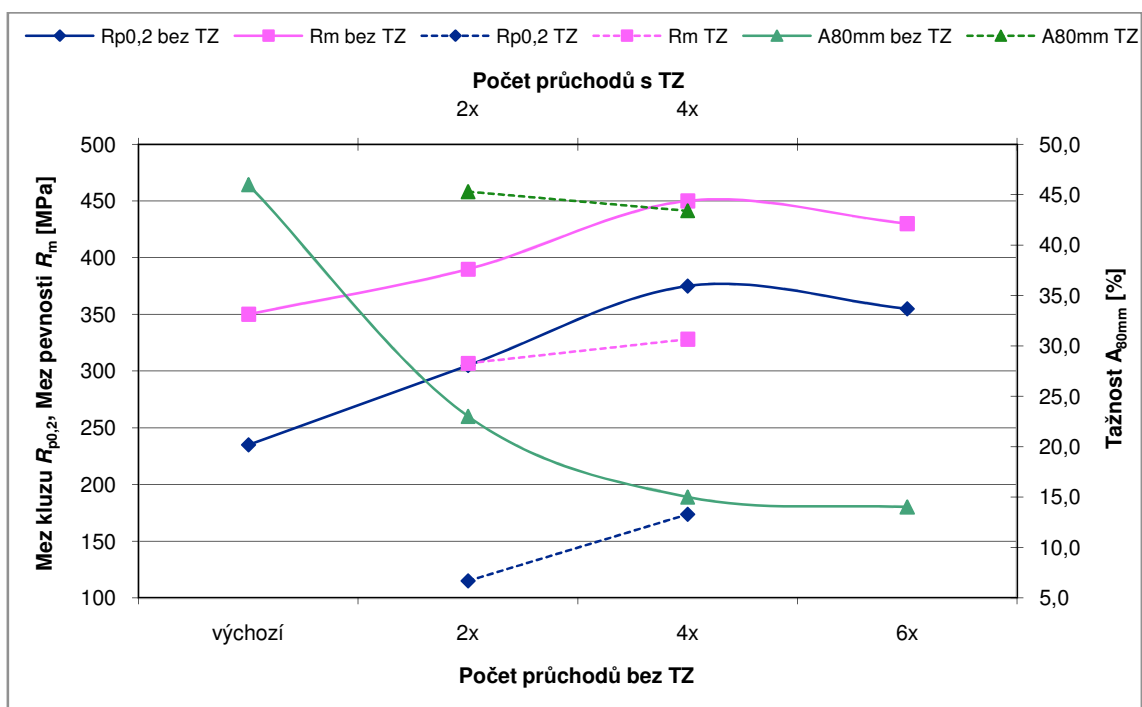
Tabulka č. 3.11 Dosažené hodnoty mechanických vlastností pásu plechu z mosazi Cu75Zn35 po tepelném zpracování (450°C/15 min)

Počet průchodů	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
2x	115	307	45,3
4x	174	328	43,4



Graf č. 3.9 Zobrazení meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti mosazi Cu75Zn35 po tepelném zpracování (450°C/15 min)

Srovnání mechanických vlastností (mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{80}) u tepelně nezpracované i zpracované mosazi CU65Zn35 jsou uvedeny v grafu č. 3.10.



Graf č. 3.10 Srovnání obou verzí mosazi (tepelně nezpracovaná i tepelně zpracovaná)

Dílčí hodnocení výsledků.

Z tabulky č. 3.11 i grafu č. 3.9 je patrné, že hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m se až po 4. průchodu přibližují k hodnotám plechu ve výchozím stavu. Z grafu č. 3.10, kde je uvedeno porovnání počtu průchodů zařízením DRECE mosazného plechu na mechanické vlastnosti. Hodnota tažnosti A_{80} se zvýšila ve srovnání se 4. průchodem bez tepelného zpracování ($A_{80} = 15\%$, s tepelným zpracováním $A_{80} = 45\%$). Dochází ovšem ke snížení hodnot mechanických vlastností viz graf č. 3.10. Mez kluzu bez tepelného zpracování při 4. průchodu $R_{p0,2} = 375 \text{ MPa}$, mez kluzu s tepelným zpracováním při 4. průchodu $R_{p0,2} = 174 \text{ MPa}$. Z tohoto důvodu se od této varianty tepelného zpracování ustoupilo a dále bylo použito tepelné zpracování 200°C (15 min.).

3.4 Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi s tepelným zpracováním ($200^\circ\text{C}/15 \text{ min}$) na mechanické vlastnosti.

Znova byly porovnány změny rozměrů při protlačovacím procesu u plechu z mosazi Cu65Zn35 s tepelným zpracováním. Materiál byl po předchozím zpracování procesem DRECE mezioperačně přezíhán ($200^\circ\text{C}/15 \text{ min}$). Všechny pásy mosazi byly dále protlačovány na celkový počet průchodů 8. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 3.12. Všechny rozměry (délka-l, šířka-b, tloušťka-t) byly změřeny v místech vyobrazených na obrázku č. 21.

Tabulka č. 3.12 Tabulka naměřených hodnot pro tepelně zpracovaný ($200^\circ\text{C}/15 \text{ min}$) mosazný plech

průchod	otočení [°]	l x š x t [mm]							mazání	tlak [bar]	přítlak [Nm]
		l_1	b_1	b_2	b_3	t_1	t_2	t_3			
0		300	57,45	57,46	57,66	1,74	1,74	1,75			
1	0	296	57,65	57,51	57,79	1,70	1,76	1,80	ano	110	40
2	180	293	57,62	57,77	58,01	1,76	1,79	1,80	ano	110	40
3	0	290	57,90	57,91	58,10	1,76	1,78	1,83	ano	110	40
4	180	287	58,04	58,12	58,35	1,79	1,84	1,88	ano	130	40
Žíháno ($200^\circ\text{C}/15 \text{ min}$)											
5	0	284	58,13	58,19	58,39	1,84	1,86	1,84	ano	130	40
6	180	283	58,20	58,28	58,55	1,84	1,88	1,89	ano	130	40
7	0	283	58,26	58,43	58,59	1,79	1,85	1,85	ano	140	40
8	180	282	58,40	58,58	58,76	1,84	1,98	1,93	ano	140	40

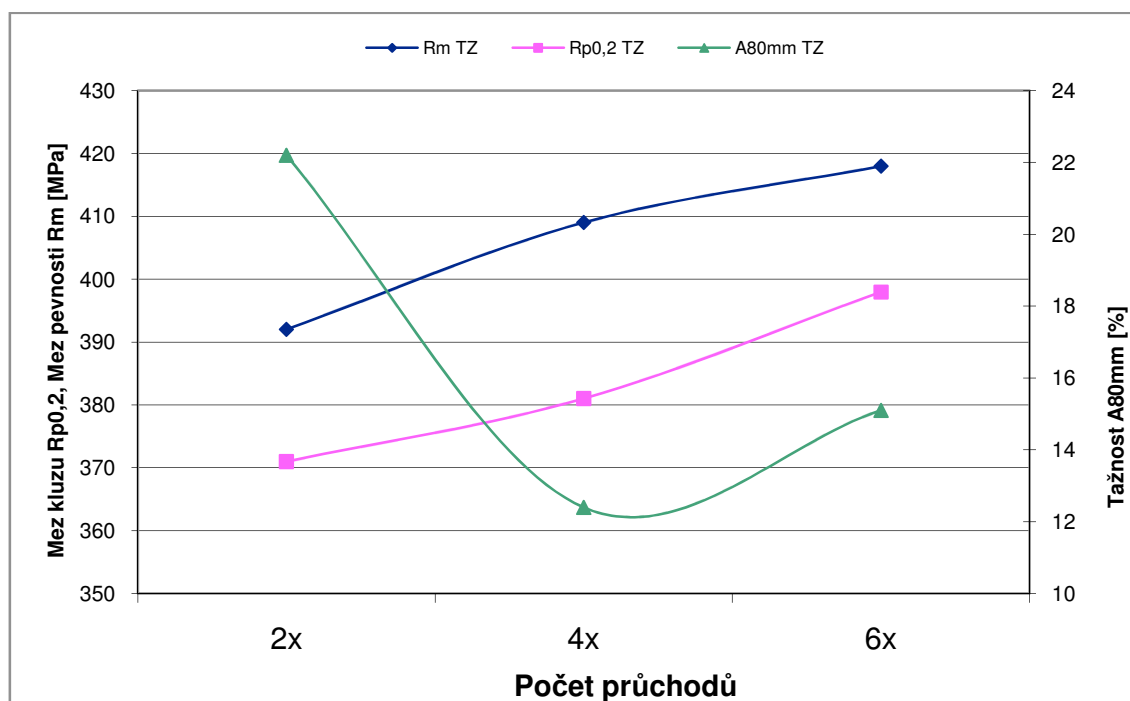
Z tabulky je opět patrné, že se daný plech zkracuje a zároveň rozšiřuje. Tento konkrétní mosazný pás plechu se celkově zkrátil o 18 mm.

Experimentálně byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti mosazi Cu65Zn35, mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{80} . V tabulce č. 3.14 jsou uvedeny hodnoty všech tří zmíněných veličin a dále jsou vyneseny do grafu č. 3.12.

Pro srovnání uvádím tabulku 3.13, kde jsou hodnoty vybraných mechanických vlastností při 2, 4, a 6 průchodu a následném tepelném zpracování (200°C/15 min).

Tabulka 3.13 Dosažené hodnoty mechanických vlastností pásu plechu z mosazi Cu75Zn35 po tepelném zpracování (200°C/15 min)

Počet průchodů	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
2x	371	392	22,2
4x	381	409	12,4
6x	398	418	15,1



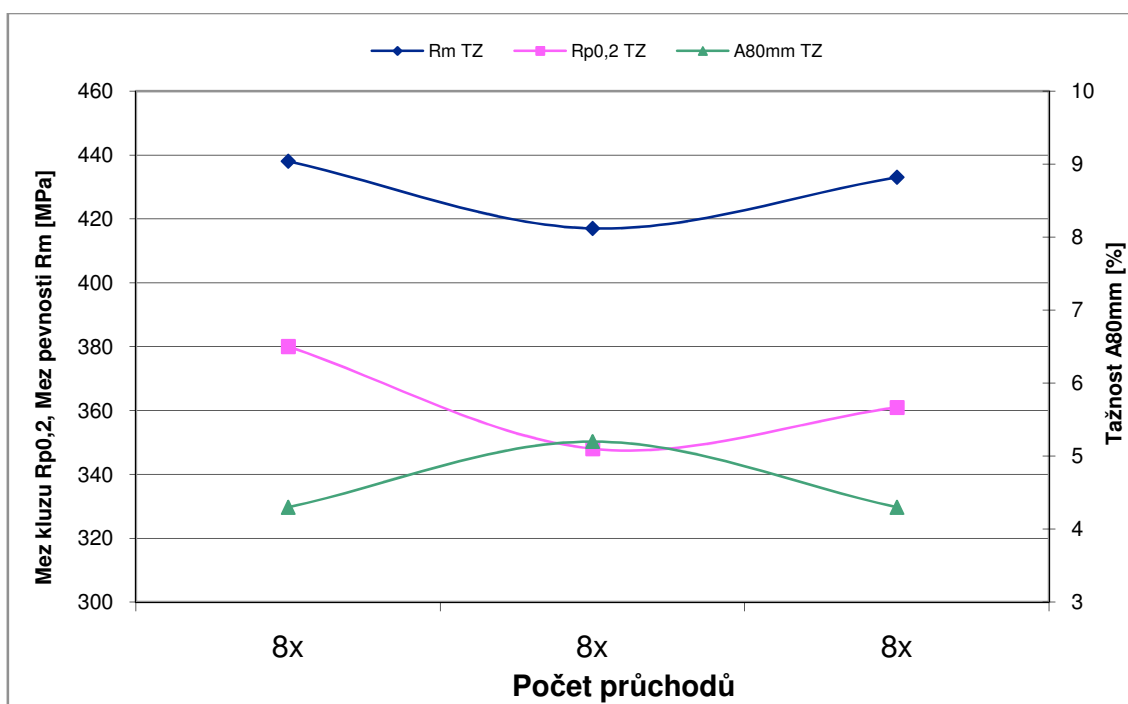
Graf č. 3.11 Zobrazení meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti mosazi Cu75Zn35 po tepelném zpracování (200°C/15 min)

Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

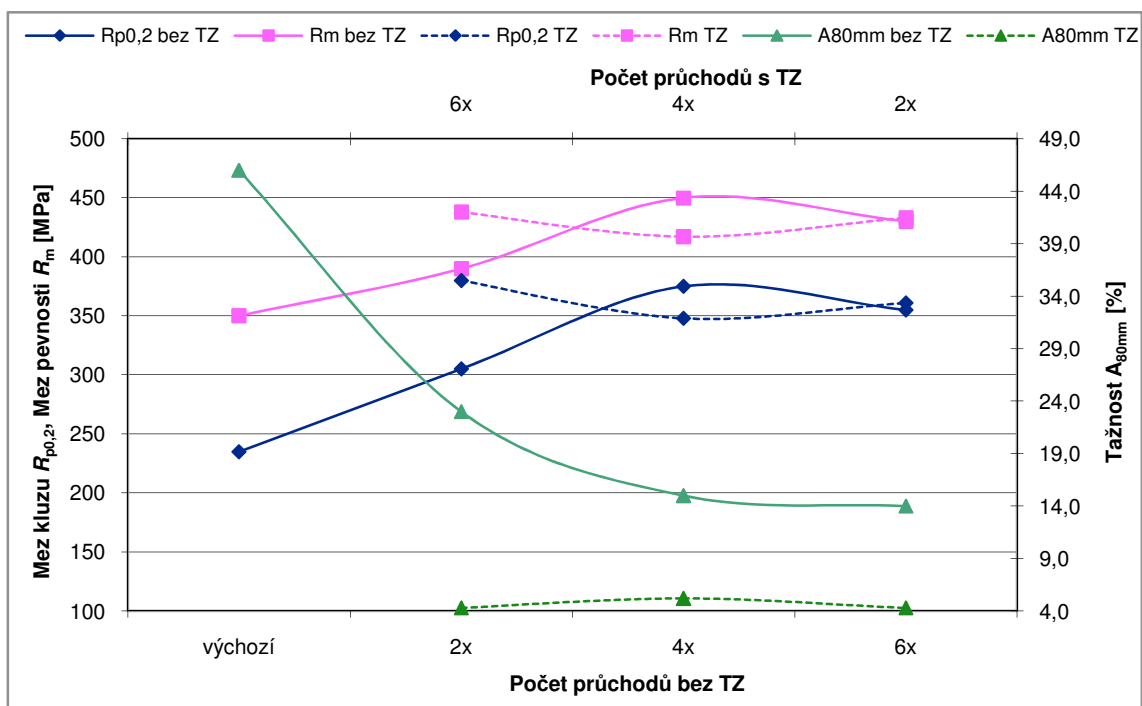
Při srovnání tabulek 3.13 a 3.14 je patrné, že hodnoty meze kluzu a meze pevnosti po DRECE a tepelném zpracování se zásadně neliší od dosažených hodnot mosazi při celkovém počtu 8 průchodů. Výrazně klesla tažnost u celkového počtu 8 průchodů, je to dáno opětovným protlačováním zařízením DRECE.

Tabulka č. 3.14 Dosažené hodnoty mechanických vlastností pásu plechu z mosazi Cu75Zn35 po tepelném zpracování (200°C/15 min) a následném protlačení na celkový počet 8 průchodů

Počet původních průchodů	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
(6+2)x	380	438	4,3
(4+4)x	348	417	5,2
(2+6)x	361	433	4,3



Graf č. 3.12 Zobrazení meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti mosazi Cu75Zn35 po tepelném zpracování (200°C/15 min) a následném protlačení na celkový počet 8 průchodů



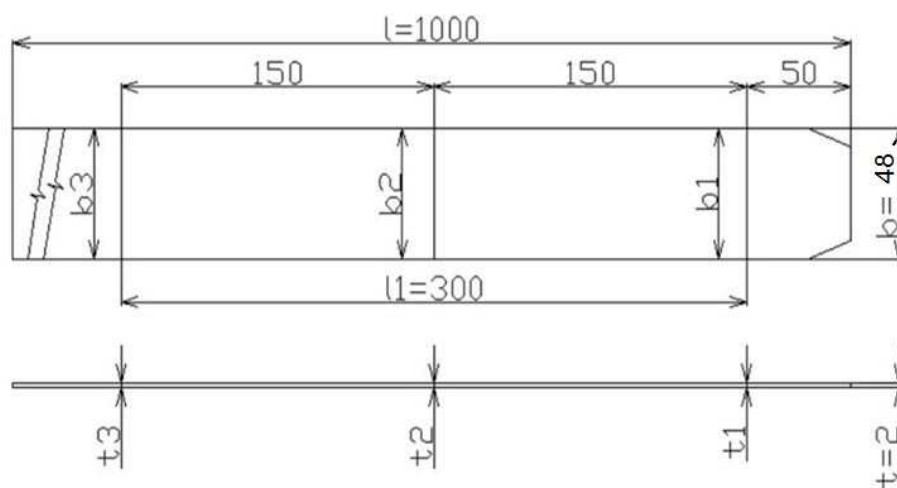
Graf č. 3.13 Srovnání mechanických vlastností mosazného plechu bez TP a plechu s TP (200°C/15 min)

Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

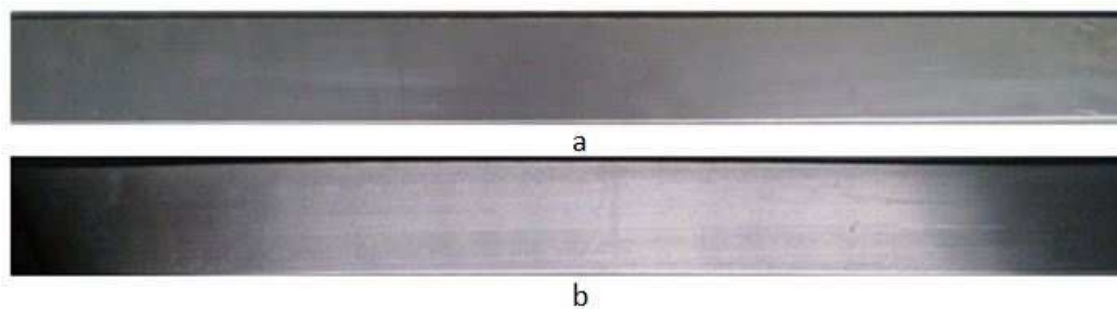
Při tomto tepelném zpracování dochází u některých průchodů ke zvýšení meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m , ale zároveň u některých průchodů jsou obě tyto veličiny o něco nižší než u tepelně nezpracované mosazi Cu65Zn35. Srovnání těchto hodnot je zobrazeno v grafu č. 3.13. Největší hodnota meze kluzu u tepelně zpracované mosazi (200°C/15 min), která byla zjištěna při původním druhém protlačení, tep. zpracování a následným protlačení na celkový počet 8 průchodů je $R_{p0,2} = 380 \text{ MPa}$. Přitom u tepelně nezpracované mosazi je největší hodnota $R_{p0,2} = 375 \text{ MPa}$ při 4. průchodu, což je téměř totožná hodnota. Také mez pevnosti se nijak extrémně neliší od tepelně nezpracované mosazi. Výrazně ovšem klesá hodnota tažnosti, která má u tepelně nezpracované mosazi nejvyšší hodnotu $A_{80} = 14\%$, zatímco u tepelného zpracované mosazi je nejvyšší hodnota $A_{80} = 4,3\%$.

4. Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti u plechu z uhlíkové oceli.

Materiál dle ČSN 41 1321 byl popsán v kapitole 2.2. Pás plechu z uhlíkové oceli s rozměry 48x2x1000 . Ocelové pásy plechu jsou o 10 mm užší než u ostatních slitin, jak je patrné z obrázku č. 4.1. Pás plechu z uhlíkové oceli byl několikrát protlačen zařízením DRECE, poté byla vyhodnocena tvrdost HV10 i mechanické vlastnosti, mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{80} . Vzorčky pásu plechu jsou uvedeny na obrázku č. 4.2.



Obrázek č. 4.1 Rozměry pásu plechu uhlíkové oceli s vyznačenými místy měření šířky, tloušťky a délky



Obrázek č. 4.2 Pás plechu z oceli 11 321 (a-výchozí stav, b-po 5. průchodech zařízením DRECE)

Provedení experimentu.

Nejprve byly porovnány změny rozměrů při protlačovacím procesu u plechu z uhlíkové oceli 11 321. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 4.1. Všechny rozměry (délka-l, šířka-b, tloušťka-t) byly změřeny v místech vyobrazených na obrázku č. 4.1.

Tabulka č. 4.1 Tabulka naměřených hodnot pro ocelový pás plechu

průchod	otočení [°]	l x š x t [mm]							mazání	tlak [bar]	přítlak [Nm]
		l ₁	b ₁	b ₂	b ₃	t ₁	t ₂	t ₃			
0		300	48,09	48,13	48,09	1,90	1,91	1,89			
1	0	298	48,64	48,51	48,30	2,01	1,92	1,90	ano	120	40
2	180	294	48,64	48,54	48,55	1,90	1,96	1,91	ano	120	40
3	0	290	48,82	48,89	48,75	1,90	1,98	1,93	ano	120	40
4	180	285	48,92	49,08	48,90	1,92	1,99	1,98	ano	120	40
5	0	280	48,99	49,28	49,14	1,86	2,01	1,98	ano	120	40
6	180	277	49,08	49,58	49,37	1,83	2,04	2,03	ano	120	40

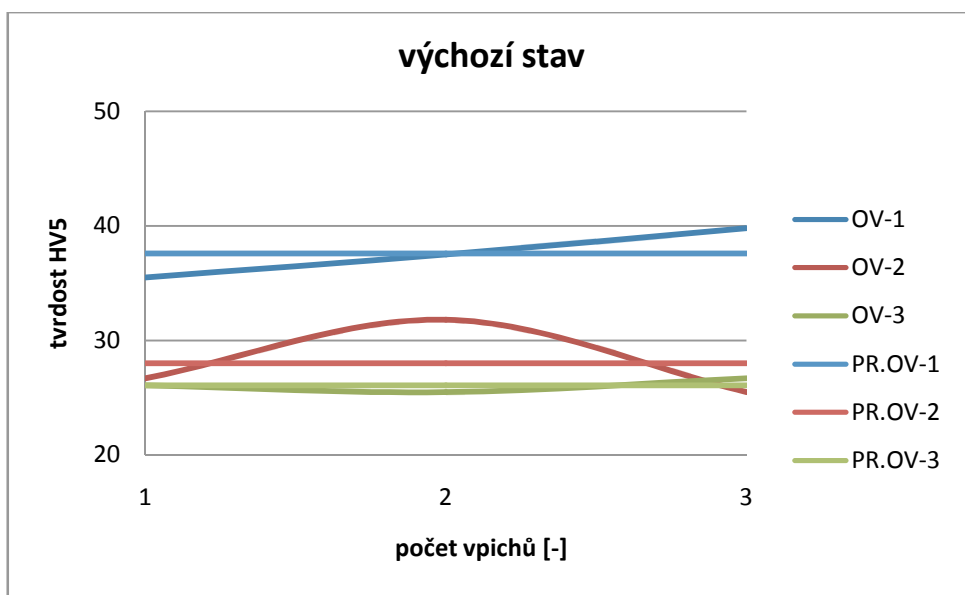
Z uvedené tabulky je viditelné, že ocelový pás plechu se chová obdobně jako předchozí mosaz. Měřená délka se zmenšuje o maximální hodnotu 23 mm a šířka naopak roste.

Hodnoty tvrdostí dle Vickerse (HV10) pásu plechu z oceli 11 321.

Nejprve byla vyhodnocena ocel 11 321 ve výchozím stavu, viz tabulka č. 4.2.

Tabulka 4.2 Hodnoty tvrdostí oceli 11 321 ve výchozím stavu

vzorek	měření	tvrdost	x = 37,6	vzorek	měření	tvrdost	x = 28	vzorek	měření	tvrdost	x = 26,1
OV-1	1	35,5		OV-2	1	26,7		OV-3	1	26,1	
	2	37,5			2	31,8			2	25,5	
	3	39,8			3	25,5			3	26,7	

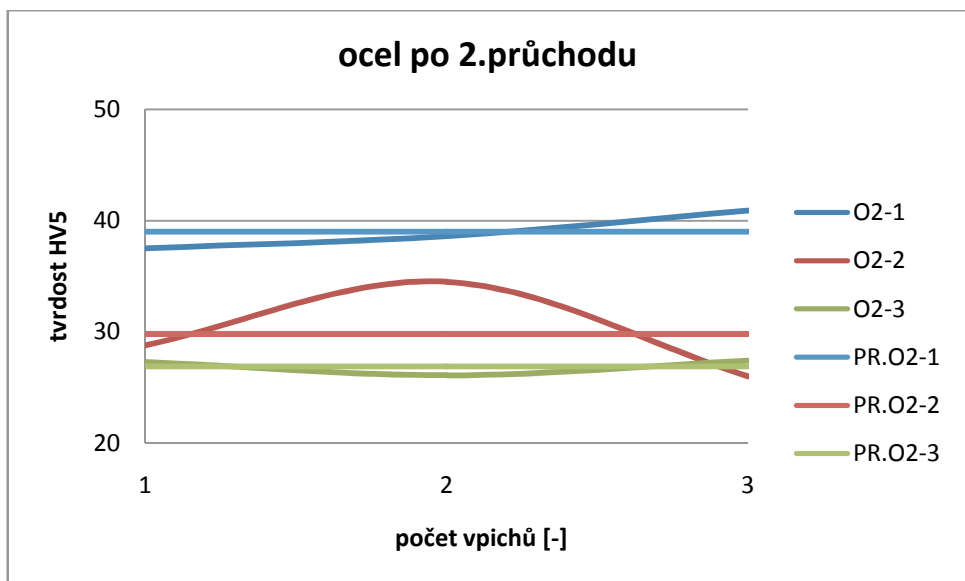


Graf č. 4.1 Dosažené hodnoty tvrdosti pro ocel 11 321 ve výchozím stavu (PR-průměrná hodnota)

V tabulce č. 4.3 jsou hodnoty pro pás plechu z uhlíkové oceli po druhém průchodu zařízením DRECE. Materiál byl popsán v kapitole 2.1.

Tabulka 4.3 Hodnoty tvrdostí oceli 11 321 po 2 průchodu zařízením DRECE

vzorek	měření	tvrdost	x = 39	vzorek	měření	tvrdost	x = 29,8	vzorek	měření	tvrdost	x = 26,9
O2-1	1	37,5		O2-2	1	28,8		O2-3	1	27,3	
	2	38,6			2	34,5			2	26,1	
	3	40,9			3	26			3	27,4	



Graf č. 4.2 Dosažené hodnoty tvrdosti pro ocel 11 321 po 2 průchodu zařízením DRECE (PR-průměrná hodnota)

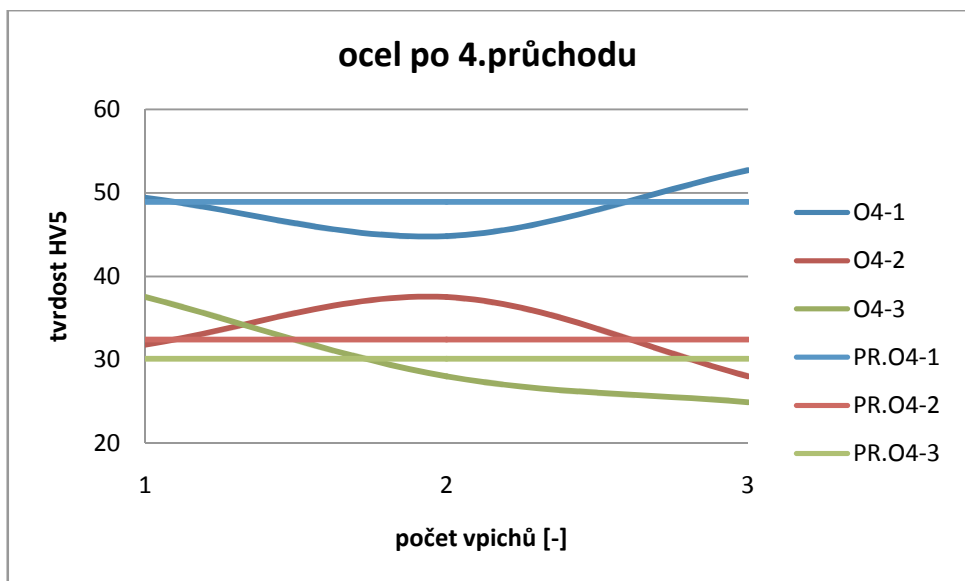
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Ocel při 2 průchodu zařízením DRECE vykazuje homogenní hodnoty tvrdosti. Největší tvrdost – 40,9 HV10 byla změřena na povrchu vzorku z uhlíkové oceli. Zde byla změřena i největší průměrná hodnota tvrdosti – 39 HV10.

V tabulce č. 4.4 jsou zjištěné hodnoty pro pás plechu z uhlíkové oceli po 4 průchodu zařízením DRECE.

Tabulka č. 4.4 Hodnoty tvrdostí oceli 11 321 po 4 průchodu zařízením DRECE

vzorek	měření	tvrdost	x = 48,9	vzorek	měření	tvrdost	x = 32,4	vzorek	měření	tvrdost	x = 30,1
O4-1	1	49,4		O4-2	1	31,8		O4-3	1	37,5	
	2	44,8			2	37,5			2	28	
	3	52,7			3	28			3	24,9	



Graf č. 4.3 Dosažené hodnoty tvrdosti pro ocel 11 321 po 4 průchodu zařízením DRECE (PR-průměrná hodnota)

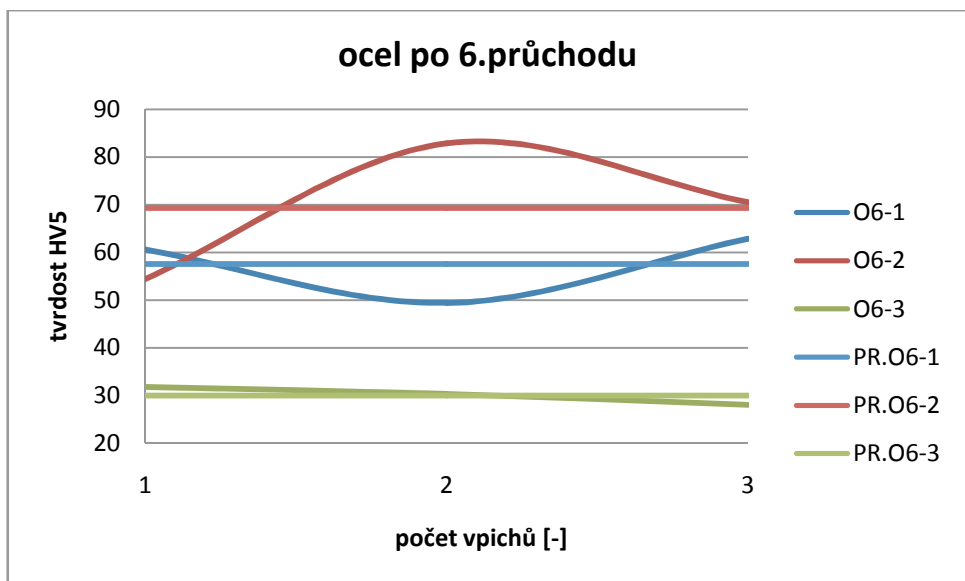
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Při 4 průchodu zařízením DRECE ocel 11 321 vykazuje opět homogenní rozložení tvrdosti. Největší hodnoty byly změřeny na povrchu vzorku z uhlíkové oceli – 52,7 HV10. Naopak nejnižší hodnota tvrdosti – 24,9 HV10 se vyskytuje u podélného průřezu vzorku.

V tabulce č. 4.5 jsou zjištěné hodnoty pro pás plechu z uhlíkové oceli po 6 průchodu zařízením DRECE.

Tabulka č. 4.5 Hodnoty tvrdostí oceli 11 321 po 6 průchodu zařízením DRECE

vzorek	měření	tvrdost	x = 57,6	vzorek	měření	tvrdost	x = 69,3	vzorek	měření	tvrdost	x = 30
O6-1	1	60,6		O6-2	1	54,4		O6-3	1	31,8	
	2	49,4			2	82,9			2	30,3	
	3	62,9			3	70,5			3	28	



Graf č. 4.4 Dosažené hodnoty tvrdosti pro ocel 11 321 po 6 průchodu zařízením DRECE (PR-průměrná hodnota)

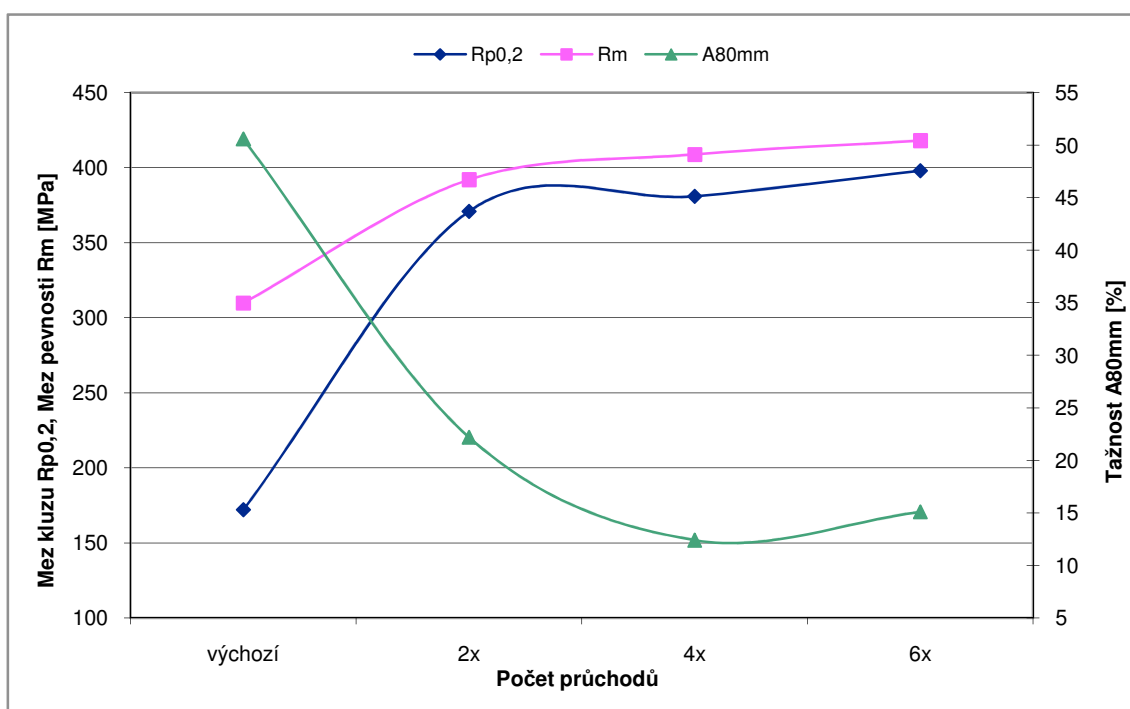
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Při druhém i čtvrtém průchodu uhlíkové oceli zařízením DRECE se vyskytovala největší tvrdost na povrchu vzorku. Při 6 průchodu se vyskytuje největší tvrdost v příčném řezu vzorku. Její hodnota 69,3 HV10 je více než dvojnásobná oproti výchozímu stavu (28 HV10). Nejnižší tvrdosti byly zaznamenány, stejně jako u předchozích měření, v podélném řezu.

Dále byly vyhodnoceny i další mechanické vlastnosti oceli 11 321, mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{80} . V tabulce č. 4.6 jsou uvedeny hodnoty všech tří zmíněných veličin a dále jsou vyneseny do grafu č. 4.5.

Tabulka č. 4.6 Dosažené hodnoty mechanických vlastností pásu plechu z uhlíkové oceli 11 321

Počet průchodů	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
výchozí	172	310	50,6
2x	371	392	22,2
4x	381	409	12,4
6x	398	418	15,1



Graf č. 4.5 Zobrazení meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti uhlíkové oceli 11 321

Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

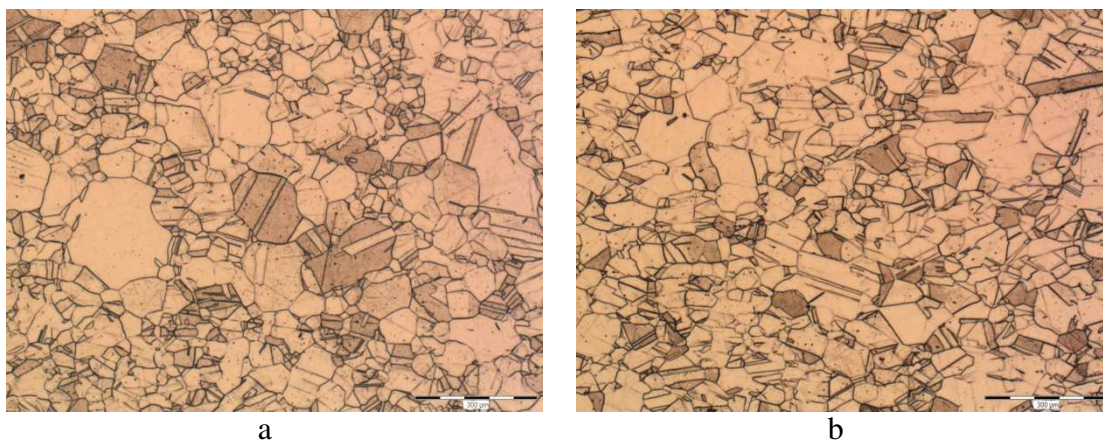
Z tabulky i grafu lze vyčíst, že hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m se výrazně zvyšují už při druhém průchodu zařízením DRECE. Další nárůst je pozvolný, maximální hodnota $R_{p0,2} = 398 \text{ MPa}$. Maximální hodnota meze pevnosti je $R_m = 418 \text{ MPa}$. Dostí výrazně ale klesá tažnost daného materiálu. Z původní hodnoty 50,6% klesla na nejnižší hodnotu 12,4% u 4. průchodu. Novým poznatkem je dosažení mírného zvýšení tažnosti po 6. Průchodu, což může být zapříčiněno uzdravovacími pochody.

5. Metalografické vyhodnocení vlivu počtu průchodů a tepelného zpracování na zjemnění zrna obou materiálů.

Všechny vzorky byly metalograficky vyhodnoceny na optickém mikroskopu ve spolupráci s fakultou Metalurgie a materiálového inženýrství na VŠB-TU Ostrava a byla vyhotovena série metalografických vyhodnocení pro pás plechu z mosazi Cu65Zn35 i pro pás plechu z uhlíkové oceli 11 321.

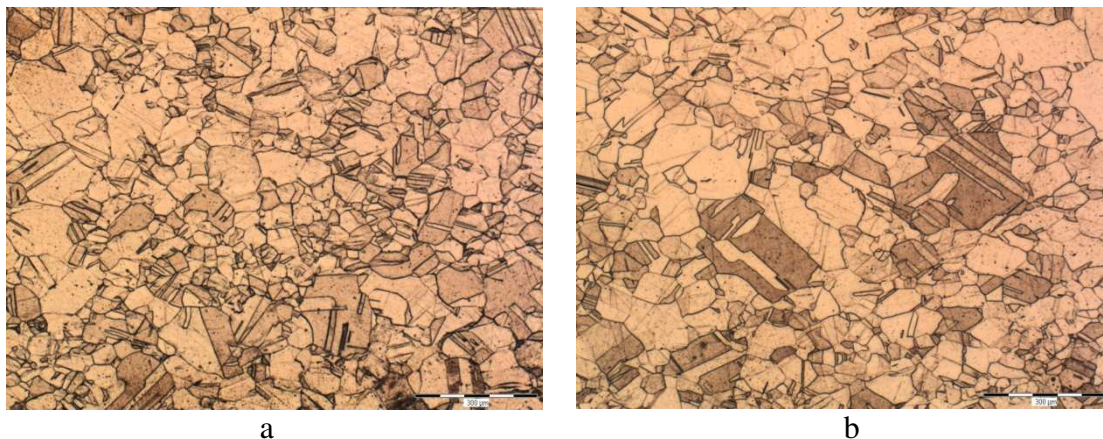
5.1. Vliv počtu průchodů u plechu z mosazi Cu65Zn35 na velikost zrna.

Nejprve byla metalograficky vyhodnocena mosaz ve výchozím stavu. Snímky jsou uvedeny na obrázku č. 5.1 (a-příčný řez, b-podélný řez).



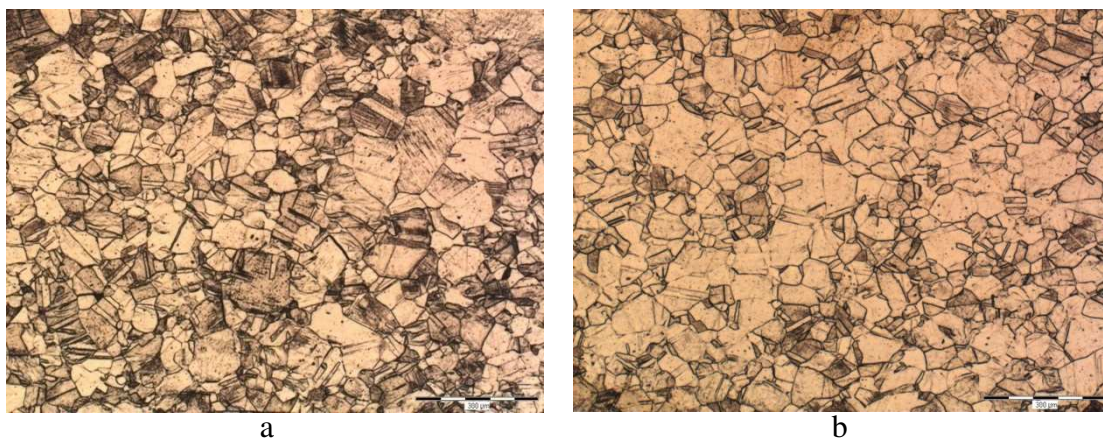
Obrázek č. 5.1 Struktura vzorku z mosazi Cu65Zn35 ve výchozím stavu (a-příčný řez, b-podélný řez)

Dále byla vyhodnocována mosaz po druhém průchodu zařízením DRECE, opět v příčném i podélném řezu. Obrázek č. 5.2 ukazuje takto vzniklou strukturu.

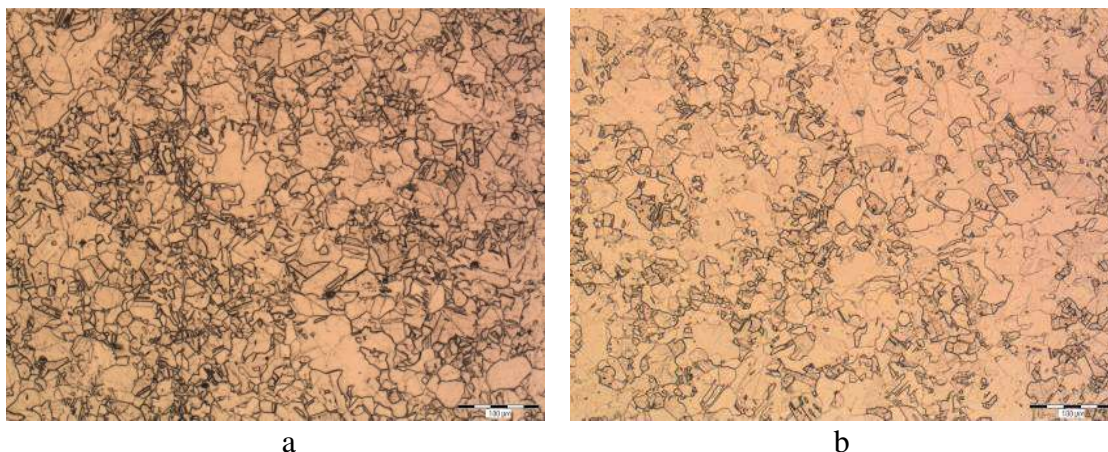


a
b
**Obrázek č. 5.2 Struktura vzorku z mosazi Cu65Zn35 po 2 průchodu zařízením DRECE
(a-příčný řez, b-podélný řez)**

Pro další vyhodnocení byl použit vzorek mosazi po 4. průchodu zařízením DRECE. Struktura je zobrazena na obrázku č. 5.3.



a
b
**Obrázek č. 5.3 Struktura vzorku z mosazi Cu65Zn35 po 4 průchodu zařízením DRECE
(a-příčný řez, b-podélný řez)**



Obrázek č. 5.4 Struktura vzorku z mosazi Cu65Zn35 po 4 průchodu zařízením DRECE a tepelném zpracování (450°C/15 min)
(a-příčný řez, b-podélný řez)

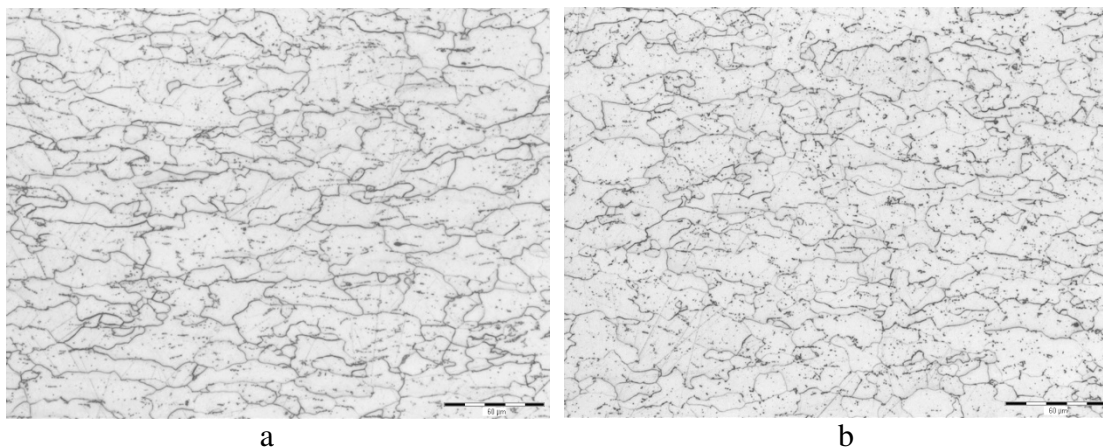
Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Z uvedené metalografické analýzy výchozího stavu plechu a po jednotlivých průchodech (zobrazeno na obr. č. 5.1 až 5.4) vyplývá, že dochází ke změně struktury a pozvolnému zmenšení střední velikosti zrna vlivem narůstajícího počtu cyklů protlačování nástrojem DRECE. Je patrný i rozdíl zejména v podélném řezu pásu plechu, kde jsou zobrazeny hranice zrn. U 4. průchodu tepelně nezpracované mosazi Cu65Zn35 je zmenšení zrna patrné (obr. č 5.3).

Nejlepšího zjemnění struktury dosáhla mosaz Cu65Zn35 4krát protlačená zařízením DRECE a následně tepelně upravena, jak bylo popsáno v kapitole 3.2 (450°C/15 min). Zmenšení velikosti zrna oproti původnímu stavu je patrné z obrázku č. 5.4.

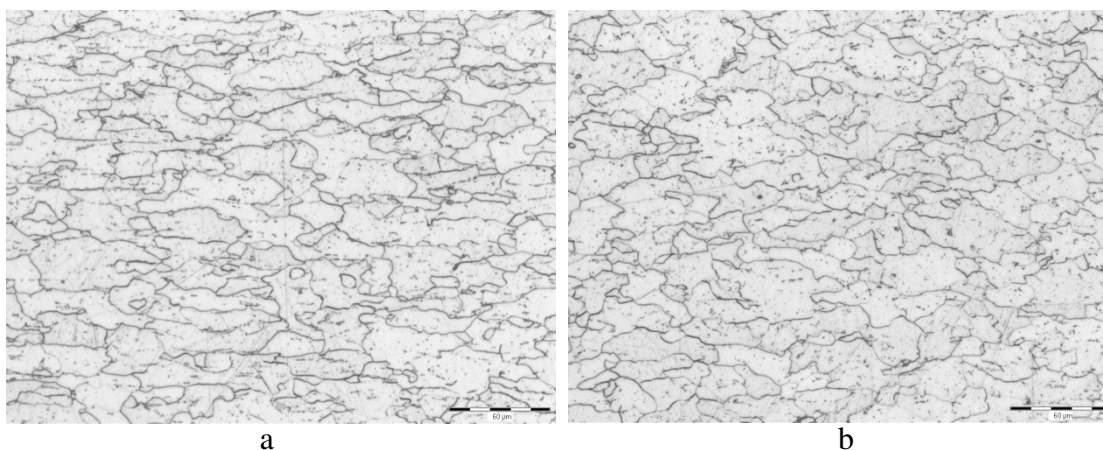
5.2. Vliv počtu průchodů u plechu z oceli 11 321 na velikost zrna.

Jako další byla metalograficky vyhodnocena ocel 11 321. Snímky jsou uvedeny na obrázku č. 5.5 (a-příčný řez, b-podélný řez).



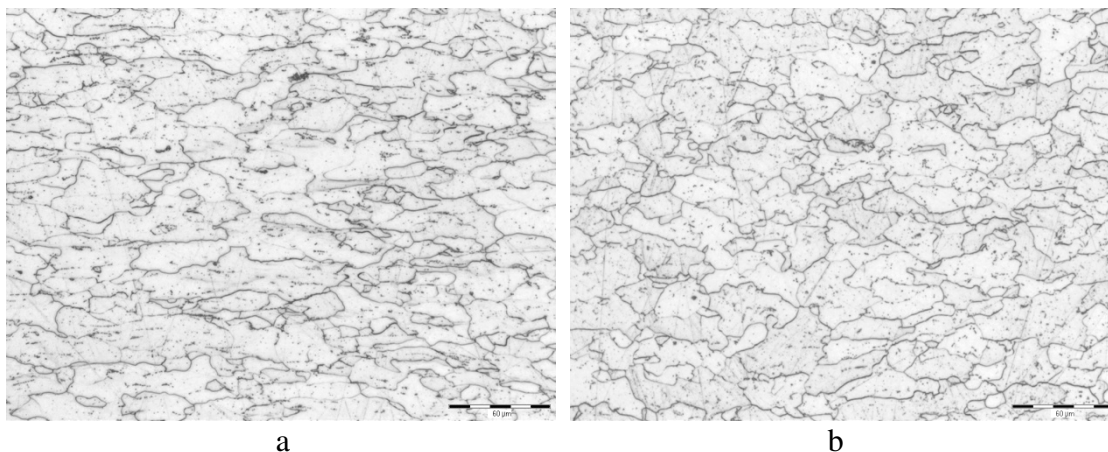
**Obrázek č. 5.5 Struktura vzorku z uhlíkové oceli 11 321 po 2 průchodu zařízením DRECE
(a-příčný řez, b-podélný řez)**

Dále byla metalograficky vyhodnocována ocel po 4 průchodu zařízením DRECE, opět v příčném i podélném řezu. Obrázek č. 5.6 ukazuje takto vzniklou strukturu.



**Obrázek č. 5.6 Struktura vzorku z uhlíkové oceli 11 321 po 4 průchodu zařízením DRECE
(a-příčný řez, b-podélný řez)**

Následuje metalografické vyhodnocování oceli po 6 průchodu zařízením DRECE, v příčném i podélném řezu. Na obrázku č. 5.7 lze vidět takto vzniklou strukturu.



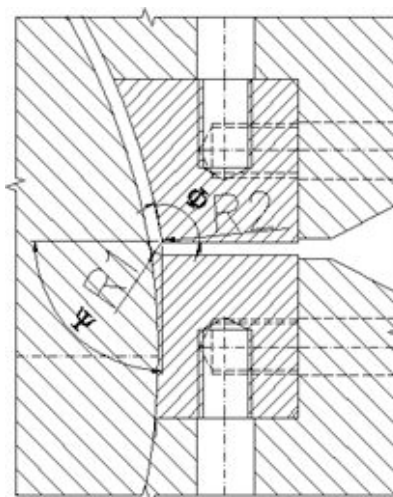
Obrázek č. 5.7 Struktura vzorku z uhlíkové oceli 11 321 po 6 průchodu zařízením DRECE (a-příčný řez, b-podélný řez)

Dílčí hodnocení dosažených výsledků.

Metalografické výsledky u vzorku z uhlíkové oceli 11 321 nejevili známky výraznějšího zjemnění struktury s následujícími průchody zařízením DRECE. Jak je uvedeno na obrázcích č. 5.5 – 5.7. Průměrná velikost zrna byla stanovena dle ČSN EN ISO 643 jako G 8-9. Tuto hodnotu vykazovaly všechny vyhodnocované vzorky oceli po 2, 4 i 6 průchodu v příčném i podélném řezu.

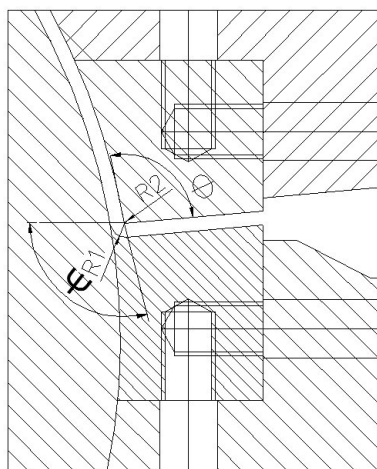
6. Konstrukční úpravy tvářecího nástroje u zařízení DRECE na zvýšení efektivity protlačovacího procesu.

Pro ještě větší zjemnění a zrovnoměnění struktury byl původní tvářecí nástroj (obrázek č. 6.1) upraven. Byly upraveny úhly v protlačovacím kanále. Jak vnější nástrojový Ψ , tak i vnitřní nástrojový úhel Φ .



Obrázek č. 19 Detail nástrojů stávajícího protlačovacího kanálu se zvýrazněnými nástrojovými úhly

Oproti stávajícímu nástroji má nový větší vnější nástrojový úhel, pro zajištění ještě jemnější struktury daných vzorků. Tato nástrojová změna by měla zajistit zvýšení efektivity protlačovacího procesu zařízením DRECE. Nákres nového nástroje je na obrázku č. 6.2. Vzhledem k budoucímu užití zařízení DRECE neuvádím žádné rozměry ani hodnoty nástrojových úhlů.



Obrázek č. 20.2 Detail nástrojů nově vytvořeného protlačovacího kanálu se zvýrazněnými nástrojovými úhly

7. Celkové vyhodnocení dosažených výsledků.

Hlavním cílem diplomové práce bylo ověření nové koncepce zařízení pro výrobu velmi jemnozrnných materiálů. Následně posouzení vlivu počtu průchodů zařízením DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion) na změny mechanických vlastností (mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , tažnost A_{80} a tvrdost dle Vickerse) a změnu vnitřní mikrostruktury zadaných materiálů. Byly zkoumány dva druhy materiálů, mosaz Cu65Zn35 a uhlíková ocel 11 321. Oba zmíněné materiály byly ve formě 1000 mm dlouhých a 2 mm tlustých plechů, viz obrázek 2.2.

Jako první byl vyhodnocován vliv počtu průchodů pro mosaz Cu65Zn35 na změny mechanických vlastností. Nejdříve byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti výchozího stavu ověřované mosazi Cu65Zn35. Dále byly analyzovány dvě varianty vlivu tepelného zpracování na její mechanické vlastnosti. U všech variant byla provedena metalografická analýza a zhodnocení mechanických vlastností po 2, 4 a 6 průchodu zařízením DRECE.

Je možno konstatovat, že po každém následujícím průchodu mosazného plechu jeho tvrdost poměrně plynule narůstá. Největší hodnota tvrdosti byla změřena v příčném řezu daného pásu plechu a to 165 HV5. Oproti původnímu stavu (113 HV5) vzrostla tvrdost až o 50%. Mez kluzu i mez pevnosti do 4. průchodu roste téměř exponenciálně, u 6. průchodu její velikost mírně klesá. Největší hodnota meze kluzu 375 MPa a meze pevnosti 450 MPa byla dosažena po 4 průchodu. Zvýšení proti výchozímu stavu ($R_{p0,2} = 172$ MPa, $R_m = 310$ MPa) je velmi výrazné. Významným poznatkem je zvýšení meze kluzu o více než 100%. Na úkor tohoto zvýšení se snižuje tažnost, a to výrazně do 4. průchodu, následně její hodnota stagnuje. Z původních 45% se tažnost snížila až na hodnotu 14%. Pro zamezení takového poklesu tažnosti byla mosaz vyžíhána nejprve po 2, 4 a 6 průchodu při teplotě 450°C po dobu 15 min. Takto vyžíhané vzorky ovšem nevykazovaly výraznější navýšení tažnosti oproti vzorkům bez tepelného zpracování. Z tohoto důvodu bylo od této varianty ustoupeno. Jako další varianta tepelného zpracování bylo zvoleno opět nejprve protlačení pásu plechu zařízením DRECE a následné žíhání při 200°C, výdrž na této teplotě 15min a ochlazení na vzduchu (po 2., 4. a 6 průchodu). Všechny takto tepelně zpracované vzorky byly znovu protlačeny zařízením DRECE na celkový počet 8 průchodů a porovnány mechanické vlastnosti se vzorky bez TZ. Tyto vzorky vykazaly téměř totožné hodnoty meze kluzu a meze

pevnosti ale výrazně se snížila tažnost ve srovnání se stejným počtem průchodů vzorků bez TZ. Při 6 průchodu má tepelně nezpracovaná mosaz hodnotu tažnosti 14 %, vyžíhaný vzorek má po 6 průchodu tažnost pouze 4.3 %.

Z hlediska experimentu lze konstatovat, že dosavadní tepelná úprava nemá zásadní vliv na vybrané mechanické vlastnosti (mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m). Na vzorcích pásů plechů z mosazi Cu65Zn35 bylo jednoznačně prokázáno, že při zvyšujícím se počtu průchodů dochází k nárůstu hodnot tvrdosti. Hodnoty mechanických vlastností nenarůstají jen do 4. průchodu. Je možno konstatovat, že dochází k deformačnímu zpevnění a ke zjemnění struktury materiálu. K nejvýraznějšímu zjemnění zrna dochází při tep. zpracování 450°C/15 min, na úkor toho ale výrazně klesá mez kluzu i pevnosti. Tato skutečnost je nežádoucí.

Jako další byl vyhodnocován vliv počtu průchodů zařízením na změny mechanických vlastností DRECE u oceli dle ČSN 11 321, dle EN DC01. Opět byla provedena metalografická analýza tohoto materiálu. Zvyšování tvrdosti u tohoto materiálu je pozvolné. Znamená to, že střední velikost zrna zůstává téměř konstantní, jak bylo také dokázáno metalografickým vyhodnocením. Průměrná velikost zrna byla stanovena dle ČSN EN ISO 643 - G 8-9 u všech průchodů zařízením DRECE. Navýšení meze kluzu a meze pevnosti je nejvýraznější u 2 průchodu. Proti výchozímu stavu se hodnoty zvyšují velice výrazně: 2 průchod ($R_{p0,2} = 172$ MPa, $R_m = 310$ MPa), 6 průchod ($R_{p0,2} = 398$ MPa, $R_m = 418$ MPa). V souvislosti s tímto se bohužel opět snižuje hodnota tažnosti, z původních 50,6 % na 15,1 % při 6 průchodu zařízením DRECE. Z tohoto důvodu je pro dosažení menšího snížení tažnosti u daného typu oceli navrženo TZ (žíhání na 500°C/0,5 hod., ochlazení na vzduchu).

V jedné z posledních částí je uveden návrh změny tvářecích nástrojů pro zařízení DRECE pro zvýšení efektivity procesu SPD (zvýšení stupně deformace v jednotlivých průchodech). Daná změna konstrukce bude ověřována v dalších výzkumných pracích.

Návrh dalšího postupu

Z hlediska dalších výzkumných prací považují zjištění optimálního provedení TZ pro oba ověřované materiály, jako stěžejní úkol pro dosažení požadovaných mechanických a tvářecích vlastností.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Stanislavu Ruzzovi, CSc., Ing. Janu Kedroňovi, Ing. Stanislavu Tylšarovi a Bc. Michalovi Salajkovi z VŠB-TU Ostrava za pomoc při provádění experimentů a při řešení diplomové práce. **Problematika vývoje struktury daných materiálů byla konzultována s profesorem Janem Dutkiewiczem z polské akademie KRAKOV.**

Seznam použité literatury:

- [1] LOWE, C. T., VALIEV, R. Z The use of severe plastic deformation techniques in grain refinement, *JOM – Journal of the Minerals, Metals and Materials society*, October 2004, vol. 56, p. 64 – 68
- [2] VALIEV, R. Z. The new trends in fabrication of bulk nanostructured materials by SPD processing, *Springer Science+Business Media*, 18 January 2007 [online], Dostupné z www <<http://www.springerlink.com/content/a0085g186j7h40mm/>>
- [3]. Wang Y, Chen M, Zhou F, Ma E. *Nature* 419:912
- [4] RUSZ, S., MALANÍK, K., KEDROŇ, J., SKOTNICOVÁ, I. Nové poznatky z vývoje a zkušebního provozu prototypového zařízení DRECE: *sborník příspěvků mezinárodní konference NANOCON*, Rožnov pod Radhoštěm 20. - 22. října 2009 [online], Dostupné z www <<http://www.nanocon.cz/data/nanocon2009/sbornik/Lists/Papers/019.pdf>>.
- [5] BEYGELSIMER, Ya.E. O. V. MIKHAILOV, A.S. SYNKOV, M. B. Shtern Twist extrusion of powder billets. 2. Experiment and discussion - *Physics and technics of high pressures*, 2008, vol. 18, p.92 – 97
- [6] HUANG, Y., PRANGNELL, P., B. Continuous frictional angular extrusion and its application in the production of ultrafine-grained sheet metals, *Scripta Materialia*, 26 October 2006, vol. 56, p. 333 – 336.
- [7] RUSZ, S., MICHENKA V., KEDROŇ, J., TYLŠAR, S., DUTKIEWICZ, J. Grain refinement in strip sheet prepared by DRECE machinery: *sborník příspěvků mezinárodní konference NANOCON*, Olomouc 12. - 14. října 2010